

# 論文 超高強度コンクリートの潜在的な強度発現性および水和反応に関する一考察

小泉 信一\*<sup>1</sup>・井元 晴丈\*<sup>2</sup>・菅俣 匠\*<sup>3</sup>・太田 晃\*<sup>4</sup>

**要旨:** 150N/mm<sup>2</sup>を超える強度領域では標準養生が潜在的な強度を発現させる養生方法と成り得ない場合がある。そこで、該強度領域の強度発現性に大きく寄与するシリカフェームの反応率の温度依存性を利用した温水養生による強度発現性の検討を行った。構造体コンクリートの強度発現性を想定した簡易断熱養生の強度に対して温水養生は早期材齢から良好な強度発現性を示し、80°Cでは材齢7日で、40°Cでは材齢28日で強度が上回り、且つ材齢91日においても養生温度が高い程、強度が高くなった。温水養生は潜在的な強度発現性を評価する方法として有効であり、該強度領域において経済的な調合設計に利用できる可能性が考えられた。

**キーワード:** シリカフェーム混入セメント, 温水養生, ポテンシャル強度, 反応率

## 1. はじめに

昨今、設計基準強度 (Fc) 100N/mm<sup>2</sup> 以上の超高強度コンクリートが、高層 RC 造建物の下層階の柱等に利用されており、現在では Fc150N/mm<sup>2</sup> までが実用化に至っている<sup>1),2)</sup>。該強度領域のコンクリートに関する研究・報告の中には、1) 長期材齢にかけて標準養生の強度が構造体コンクリートの強度を下回る傾向にあることや、2) 標準養生した場合には水結合材比に応じた強度発現性が得られず、強度が頭打ちとなる傾向にあることが報告されており<sup>3),4)</sup>、標準養生が潜在的な強度を発現させる養生方法と成り得ない場合が見受けられる。従って、該強度領域では従来の 120N/mm<sup>2</sup> までの高強度領域で使用されている強度補正值を用いた調合設計および管理方法では経済的な計画調合を得るのが難しく、その解決手法として高温養生での強度管理が検討されている<sup>5)</sup>。

既に著者らは、この現象の要因として、1) 水結合材比が 20%を下回ると、水和反応に必要な水量が不足し、標準養生ではポテンシャル強度の発現に 6ヶ月以上の長期材齢を要すること、2) 一方、柱などの実構造物で生じる 70°C程度の高温履歴下では、併用するシリカフェームの反応率が高まり、そのような水和反応に必要な水量が不足した場合でもポテンシャル強度に占める初期強度の割合が高まるため、結果的に材齢 91 日程度では圧縮強度に逆転した現象が認められることを報告している<sup>6)</sup>。

本研究では該強度領域の強度発現性に大きく寄与するシリカフェームの反応率の温度依存性を利用した温水養生の効果について検討を行い、潜在的な強度発現性および該強度領域における経済的な調合設計への適用性について考察を行った。

## 2. 試験概要

セメントにシリカフェーム混入セメント (SFC) を用いて、水セメント比 (W/C) 18.0, 15.0 および 13.0% (以下、SFC-18%, SFC-15%および SFC-13%と称す) のコンクリートおよびセメントペーストを対象に養生温度の影響について評価を行った。コンクリートおよびセメントペーストの配 (調) 合条件、フレッシュ性状を表-1, 表-2 に、使用した材料の種類および物性値を表-3 に示す。

### 2.1 供試体作製

#### (1) コンクリート

コンクリートの練混ぜは、容量 55 リットルの水平二軸形強制練りミキサを用いて、細骨材とセメント (15 秒)、水と高性能減水剤 (SFC-18% : 120 秒, SFC-15% : 150 秒, SFC-13% : 300 秒)、粗骨材 (SFC-18% : 90 秒, SFC-15,13% : 120 秒) の順に行った。目標スランプフロー : 70~75cm, 空気量 : 2.0%以下であることを確認した後、直ちに供試体 (φ10×20cm) を作製し、上面からの水分の逸散を防いで 20°C, R.H.60%環境下に存置した。

#### (2) セメントペースト

セメントペーストの練混ぜは、容量 20 リットルの機械練り用練混ぜ機 (万能混合攪拌機) を用いて、SFC-18% : 240 秒, SFC-15% : 300 秒, SFC-13% : 360 秒行った。フレッシュ性状の測定は、JASS 15T に規定される φ50×51mm の塩ビ製のフローコーンによる無振動のフロー値および単位容積質量法による空気量とした。調合毎のフロー値は、SFC-18% : 215, SFC-15% : 204, SFC-13% : 179 であり、空気量はいずれも 3.0%を下回った。フレッシュ性状の測定後、直ちに供試体 (φ5×10cm)

\*1 BASF ポゾリス(株) 開発センター (正会員)

\*2 BASF ポゾリス(株) 開発センター 博士(工学) (正会員)

\*3 BASF ポゾリス(株) 開発センター マネージャー 博士(工学) (正会員)

\*4 BASF ポゾリス(株) 開発センター センター長・ゼネラルマネージャー 博士(工学) (正会員)

表-1 配(調)合条件およびフレッシュ性状  
(コンクリート)

コンクリート											
W/C (%)	s/a (%)	Gかさ 容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 使用量 (C×%)	スランブ フロー (cm)	50cm到 達時間 (秒)	空気量 (%)	練上り 温度 (°C)
			W	C	S	G					
18.0	42.5	0.535	150	833	626	847	1.5	70.0	8.2	1.7	21.5
15.0	36.2	0.535	150	1000	481	847	2.1	74.0	10.4	1.6	22.0
13.0	29.2	0.535	150	1154	350	847	2.7	71.0	19.1	1.7	24.5

表-2 配(調)合条件およびフレッシュ性状  
(セメントペースト)

セメントペースト				
W/C (%)	混和剤 使用量 (C×%)	ペースト フロー (mm)	空気量 (%)	練上り 温度 (°C)
18.0	1.5	215	0.2	25.5
15.0	2.1	204	0.9	28.0
13.0	2.7	179	2.4	30.0

を作製し、上面からの水分の逸散を防いで 20°C, R.H.60%環境下に存置した。

2.2 養生条件

(1) 簡易断熱養生

前報<sup>6)</sup>では、コンクリートに比べてセメントペーストの最高温度が20°C程度高く、温度履歴の相違が認められたため、今回は図-1に示すようにコンクリートとセメントペーストの供試体を同一槽内に配置して材齢7日まで簡易断熱養生を行った。その後、20°C, R.H.60%環境下で封かん養生を行った。

(2) 標準水中養生

打込み二日後に脱型し、所定の材齢まで20°C水中養生を行った。

(3) 40°C, 80°C温水養生

打込み二日後に脱型し、供試体を20°Cの上水道水を入れたプラスチック製の容器に材齢毎に浸せきし、恒温恒湿器を用いて温度勾配15°C/hrで40°Cまたは80°Cに昇温した。各温度下での養生は所定の材齢の前日までとし、20°C環境下に移して温度の漸減を図った。

2.3 簡易断熱養生時の温度履歴

簡易断熱養生時の温度履歴結果の概要を表-4 および図-2に示す。

(1) コンクリート

W/C=13~18%の最高温度は62~65°C、材齢7日までの積算温度は360~371° D・Dとほぼ同程度であったが、最高温度到達時間は水セメント比の低下に伴い遅延する傾向にあった。

(2) セメントペースト

最高温度はSFC-18, 15% : 65°C, SFC-13% : 61°Cとコンクリートとほぼ同様であった。最高温度到達時間はいずれの割合もコンクリートに比べて早く、SFC-18% : 9時間, SFC-15% : 7時間, SFC-13% : 4時間の差が認められたが、その後の低下度合いはコンクリートとほぼ同様であった。また、材齢7日までの積算温度はいずれの割合もコンクリートに比べて10° D・D程度小さい値を示した。

表-3 使用材料の種類および物性値

材料	種類および物性値
結合材	シカフーム混入セメント(低熱ペースト, シカフーム混入率:10%) <sup>7)</sup>
	密度=3.08g/cm <sup>3</sup> , 比表面積=6000cm <sup>2</sup> /g
細骨材	大月産安山岩砕砂
	表乾密度=2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率=2.63%, F.M.=2.75
粗骨材	大月産安山岩砕石
	表乾密度=2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率=2.39%, F.M.=6.67 実積率=60.1%, M.S.=20mm
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤

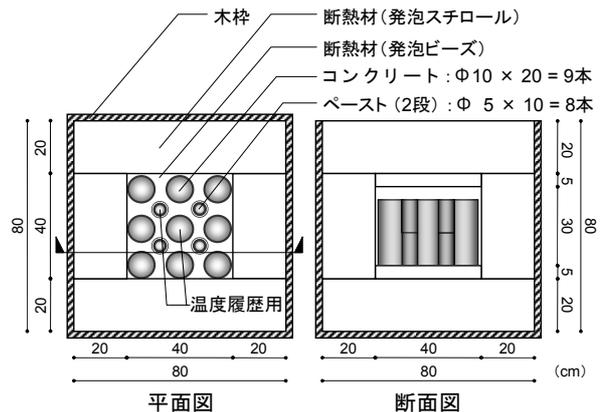


図-1 簡易断熱養生槽内の配置図

表-4 簡易断熱養生時の温度履歴

区分	コンクリート			ペースト		
	SFC 18%	SFC 15%	SFC 13%	SFC 18%	SFC 15%	SFC 13%
最高温度 (°C)	62	65	64	65	65	61
到達時間 (時間)	28	30	34	19	23	30
積算温度 (° D・D)	360	371	367	351	360	356

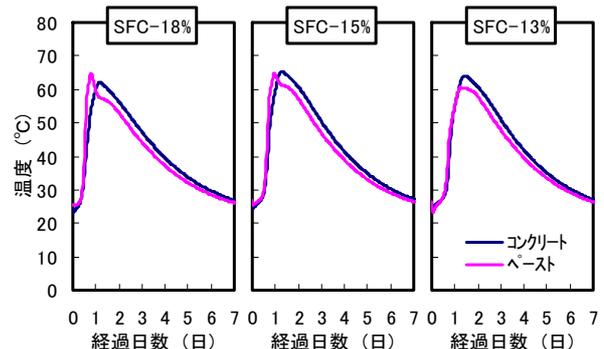


図-2 簡易断熱養生時の温度履歴

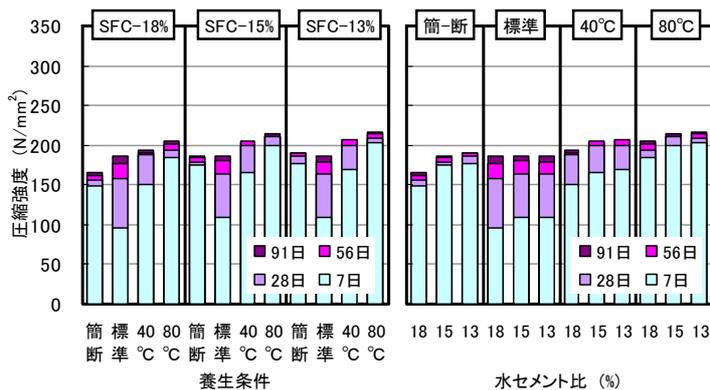


図-3 圧縮強度試験結果 (コンクリート)

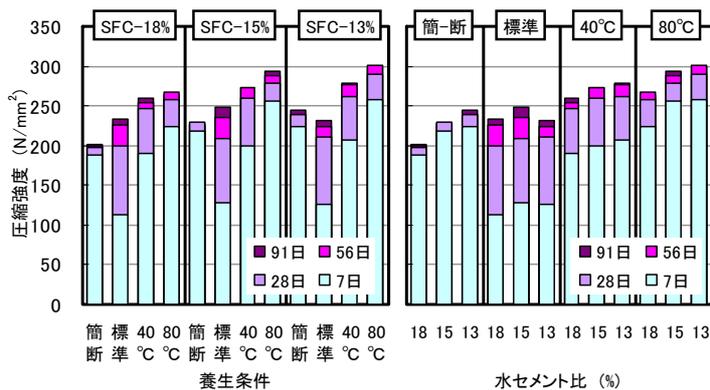


図-4 圧縮強度試験結果 (セメントペースト)

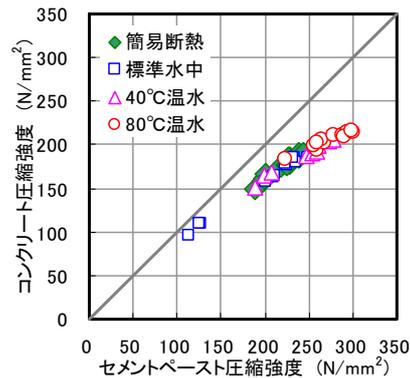


図-5 セメントペースト強度とコンクリート強度の関係

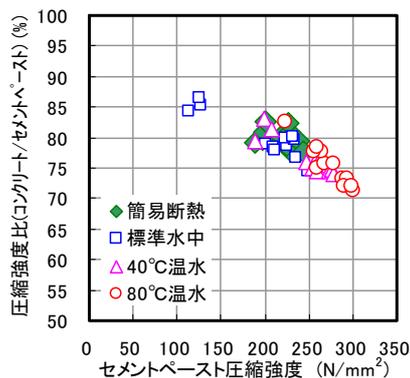


図-6 セメントペースト強度に対する  
コンクリート強度比の関係

## 2.4 硬化物性

### (1) 圧縮強度

JIS A 1108: 2006 「コンクリートの圧縮強度試験方法」  
によった。

### (2) 細孔径分布

コンクリートはφ10×20cmの供試体の中心部5cmを  
カッターで切り出し、粗粉碎後、粗骨材を除いたモルタル  
部分を、セメントペーストはφ5×10cmの供試体を粗  
粉碎したものを2.5~5.0mmに調整し、真空凍結乾燥装  
置で21日間乾燥して測定用試料とした。測定にはQuanta  
chrome社製水銀圧入式ポロシメータPore Master 60を  
用いた。

### (3) 結合水率

セメントペーストの供試体を粗粉碎後、アセトンに浸  
したまま振動ミルで微粉碎し、105°Cで3時間乾燥後デ  
シケータ内に保存したものを試料とした。日本コンクリ  
ート工学協会「コンクリートの試験・分析マニュアル」  
に準拠した方法で強熱減量を測定し、強熱後の試料(セ  
メント+シリカフェウム)重量に対する比率で表した。

### (4) 未反応シリカフェウム量

(3)と同じ試料を用いて、既往の文献<sup>8)</sup>を参考に  
HCl-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>選択溶解法によって不溶残分を測定した。測  
定結果からシリカフェウム単体の不溶残分を補正し、シ  
リカフェウム全量に対する反応率で表した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 圧縮強度

#### (1) コンクリート

コンクリートの圧縮強度試験結果を図-3に示す。簡易  
断熱養生に対する標準水中養生の圧縮強度は、SFC-18%  
では材齢28日で、SFC-15%では材齢56日で同程度とな  
ったが、SFC-13%では材齢91日においても強度が下回っ  
た。一方、40°C温水養生ではいずれの水セメント比にお  
いても材齢28日以降で強度が上回り、さらに、より高  
温の80°C温水養生では材齢7日の時点で強度が上回った。  
このように、養生温度が高くなる程、圧縮強度が高くな  
る傾向にあり、SFC-13%において標準水中養生では  
185N/mm<sup>2</sup>であったのに対して、40°C温水養生では  
206N/mm<sup>2</sup>、80°C温水養生では216N/mm<sup>2</sup>を得た。

一方、水セメント比と圧縮強度の関係では、標準水中  
養生ではW/C=18~13%にかけて強度の頭打ちが見られ  
た。これに対して、40°Cおよび80°C温水養生では、  
W/C=18~15%にかけて10N/mm<sup>2</sup>程度強度が増加したが、  
さらにW/Cを13%まで低減しても強度の増加は認めら  
れなかった。

#### (2) セメントペースト

セメントペーストの圧縮強度試験結果を図-4に示す。  
簡易断熱養生に対する各養生温度の水中養生の強度の  
関係は、コンクリートと同様の傾向を示した。なお、コ

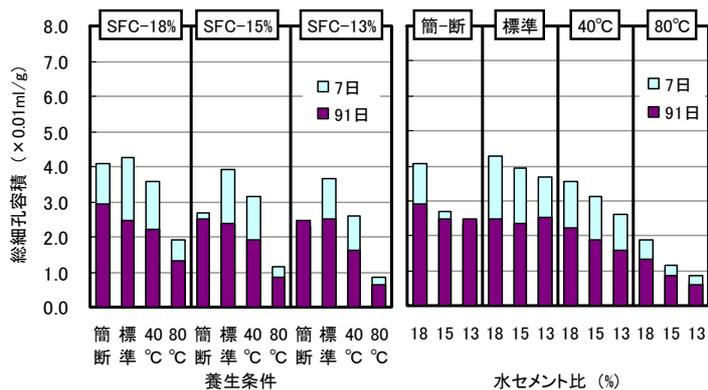


図-7 総細孔容積測定結果 (コンクリート)

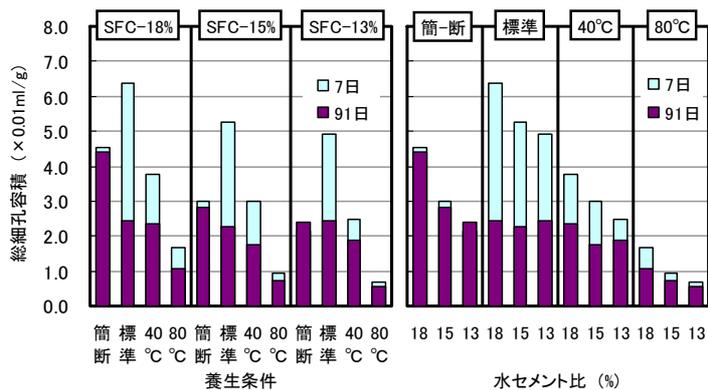


図-8 総細孔容積測定結果 (セメントペースト)

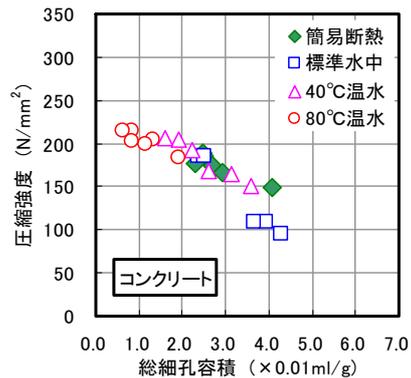


図-9 総細孔容積と圧縮強度の関係(コンクリート)

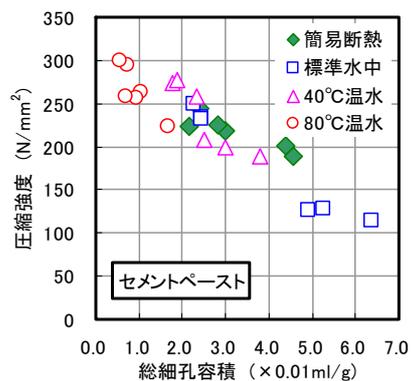


図-10 総細孔容積と圧縮強度の関係(セメントペースト)

ンクリートの結果と同様に強度発現性に及ぼす養生温度の影響が大きく、SFC-13%において標準水中養生では231N/mm<sup>2</sup>であったのに対して、40℃温水養生では278N/mm<sup>2</sup>、80℃温水養生では301N/mm<sup>2</sup>を得た。

一方、水セメント比と圧縮強度の関係では、標準水中養生では W/C=18,13%に対して W/C=15%の強度が17N/mm<sup>2</sup>程度高い値を示し、セメントペースト自身においてもC/Wに応じた強度の増加は認められなかった。これに対して、40℃および80℃温水養生条件下ではW/C=15~13%にかけての強度の増加が僅かながら認められた。

### (3) コンクリートとセメントペーストの関係

セメントペースト強度とコンクリート強度の関係を図-5に、セメントペースト強度に対するコンクリート強度比の関係を図-6に示す。両者は非常に高い相関を示しており、コンクリートで200N/mm<sup>2</sup>を超える強度領域においても概ね比例関係を示した。但し、強度が高くなるにつれて、セメントペーストに対するコンクリートの強度比が低下する傾向にあり、セメントペースト強度が200N/mm<sup>2</sup>程度では80~85%程度の強度比であったが、さらに300N/mm<sup>2</sup>程度まで増加すると強度比は70~75%程度に低下した。この現象はセメントペーストと骨材間の付着の影響および骨材自身の破壊によるものと考えられる。従って、現在の施工実績を上回る150N/mm<sup>2</sup>を

越える強度レベルのコンクリートを得るには、セメントマトリックス強度の向上のみならず、既報<sup>9)</sup>のような良質な骨材の選定および安定化技術の確立が重要であると思われる。

## 3.2 総細孔容積

### (1) コンクリート

コンクリートの総細孔容積測定結果を図-7に示す。簡易断熱養生に対する各温度の水中養生の総細孔容積を比較すると、標準水中養生ではいずれの水セメント比も材齢7日では大きい値を示し、材齢91日で同程度以下に減少しているのに対して、養生温度が高くなる程、総細孔容積が減少する傾向にあり、40℃温水養生では材齢7日の時点でもSFC-18%で小さい値を示し、さらに、より高温の80℃温水養生ではいずれの水セメント比も簡易断熱養生に対して50%を下回った。これより、該強度領域での細孔組織の緻密化に対して養生温度が大きな役割を果たしており、細孔組織が緻密な程、強度発現性が向上する傾向にあることが確認された。

一方、水セメント比と総細孔容積の関係では、標準水中養生では、いずれの水セメント比も材齢91日で同程度の値を示した。これに対して、40℃および80℃温水養生では、W/C=18~13%にかけて総細孔容積が減少する傾向にあり、水セメント比の低減により細孔組織の緻密化が確認された。

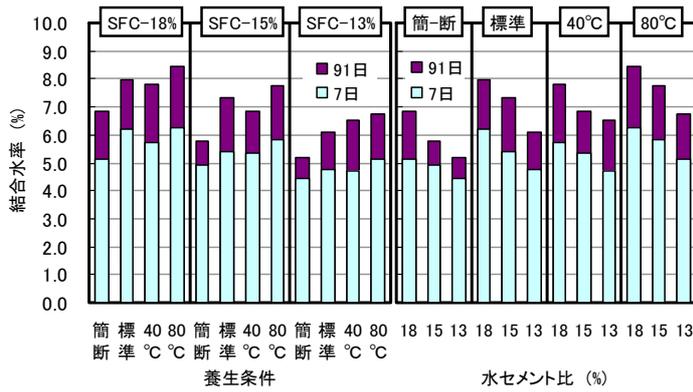


図-11 結合水率測定結果（セメントペースト）

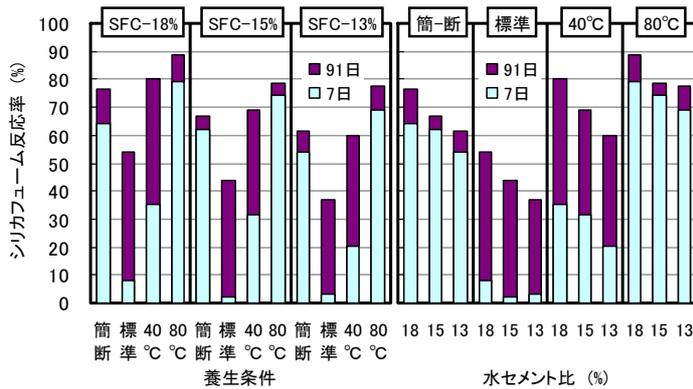


図-12 シリカフューム反応率測定結果（セメントペースト）

(2) セメントペースト

セメントペーストの総細孔容積測定結果を図-8に示す。各条件における総細孔容積は、コンクリートとほぼ同様の傾向を示した。

3.3 総細孔容積と圧縮強度の関係

総細孔容積と圧縮強度の関係を図-9, 10に示す。コンクリート、セメントペースト共に、総細孔容積が小さくなるに従い、圧縮強度が高くなる傾向を示した。なお、両者の関係は水セメント比および養生方法の違いによる差があまり見られず、概ね比例関係を示しており、細孔組織の緻密化が強度発現性の向上に大きく寄与することが確認された。

3.4 結合材の水和反応

強度発現性の向上および細孔組織の緻密化に及ぼす結合材（セメント+シリカフューム）の水和反応の影響について、セメントペーストの結合水率およびシリカフュームの反応率を指標として考察を行った。

(1) 結合水率

結合水率の測定結果を図-11に示す。いずれの養生条件も水セメント比の低下に伴い強熱減量から算出される結合水率は低下する傾向にあった。

一方、養生条件と結合水率の関係ではいずれの温度の水中養生も簡易断熱養生に比べて材齢7, 91日共に結合水率が大きく、強度発現性や総細孔容積の関係とはやや

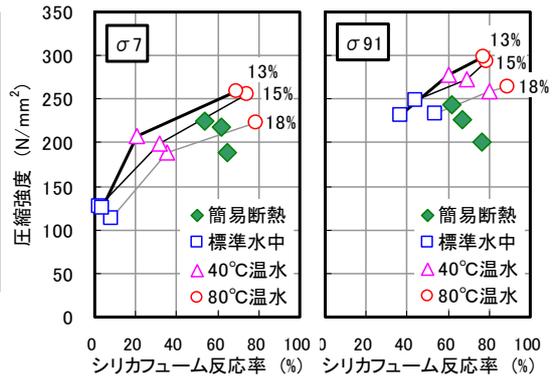


図-13 シリカフューム反応率と圧縮強度の関係

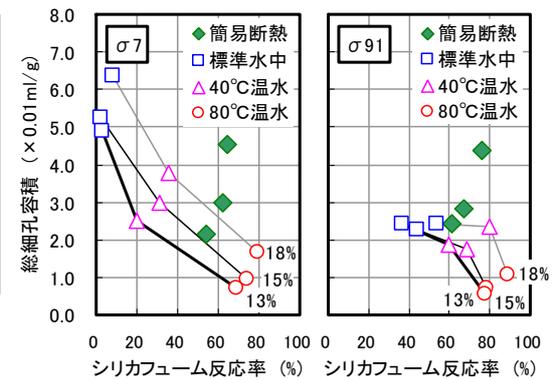


図-14 シリカフューム反応率と総細孔容積の関係

異なった。また、養生温度の違いではいずれの水セメント比も80°Cが最も大きい側にあるが、20~80°Cの結合水率の差は簡易断熱養生と水中養生との差に比べて小さい傾向にあった。

(2) シリカフューム反応率

シリカフューム反応率の測定結果を図-12に示す。結合水率の結果と同様に、いずれの養生条件も水セメント比の低下に伴い反応率が低下する傾向にあった。

一方、養生条件とシリカフューム反応率の関係では、簡易断熱養生に対して標準水中養生の反応率は材齢7, 91日の何れも下回ったが、40°C温水養生では材齢91日で同程度となり、さらに、より高温の80°C温水養生では材齢7日の時点から上回った。このように、養生温度が高くなる程、反応率が高くなる傾向にあり、材齢91日における反応率は、簡易断熱養生の61~76%に対して標準水中養生では37~54%と下回り、40°C温水養生では60~80%で同等、80°C温水養生では78~89%と上回った。

(3) シリカフューム反応率と圧縮強度、総細孔容積の関係

シリカフューム反応率と圧縮強度の関係を図-13に、シリカフューム反応率と総細孔容積の関係を図-14に示す。各養生温度の水中養生を水セメント比毎に線で繋ぐと、いずれもシリカフューム反応率と高い関係が認められ、反応率が高くなる程、総細孔容積が小さくなり圧縮

強度が高くなった。また、その関係は水セメント比が小さくなる程、同じ反応率では細孔組織が緻密になり、圧縮強度が高くなる傾向にあった。従って、硬化体組織の緻密化および強度発現性の向上にはシリカフェュームの反応率の向上が大きく寄与しており、温水養生による潜在的な強度発現性の評価方法は  $150\text{N/mm}^2$  を超えるコンクリートで有効であると考えられた。

一方、簡易断熱養生では同一水セメント比で繋いだ水中養生の線に対して、同じシリカフェューム反応率に対する総細孔容積は大きく、かつ、圧縮強度は低下した。この要因としては、簡易断熱養生の結合水率の測定結果からセメントの水和反応が他の水中養生の場合に比べて小さいことが考えられた。簡易断熱養生ではシリカフェュームの反応が促進されることで、ある程度までの強度の増進が見られるものの、水中養生に比べて未反応のセメント粒子が多く残っているため、 $40\sim 80^\circ\text{C}$  程度の温水養生に比べて強度が低くなったものと推察される。今回の報告では割愛したが、別途、水酸化カルシウム (CH) 生成量等の測定も行っており、結合水中に占める CH の量の関係も考慮してセメント粒子の反応の考察を行う予定である。

#### 4. まとめ

$150\text{N/mm}^2$  を超える強度領域の超高強度コンクリートに関して、コンクリートおよび骨材を除いたセメントペーストの調合条件で温水養生を適用し、潜在的な強度発現性および水和反応について検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) 構造体コンクリートの強度発現性を想定した簡易断熱養生の強度に対して、 $80^\circ\text{C}$  温水養生では材齢 7 日で、 $40^\circ\text{C}$  温水養生では材齢 28 日で強度が上回った。また、温水養生では早期材齢から良好な強度発現性を示し、材齢 91 日においても養生温度が高い程強度が高く、最大  $216\text{N/mm}^2$  が得られた。
- 2) 同様の水準で行ったセメントペーストも、コンクリートと概ね同様の傾向を示したが、セメントペースト強度が高くなるにつれ、セメントペーストに対するコンクリートの強度比が低下する傾向にあった。現在の施工実績を上回る  $150\text{N/mm}^2$  を越える強度レベルのコンクリートを得るには、セメントマトリックス強度の向上のみならず、良質な骨材の選定が重要であると考えられた。
- 3) 当条件のように著しく水セメント比の小さい領域においても、水セメント比および養生条件の違いに係わらず圧縮強度と総細孔容積は概ね比例関係を

示し、細孔組織の緻密化が強度発現性の向上に大きく寄与することが確認された。

- 4) 硬化体組織の緻密化および強度発現性の向上には、シリカフェュームの反応率の向上が大きく寄与しており、シリカフェュームの反応率の温度依存性を利用した温水養生は潜在的な強度発現性を評価する方法として有効であり、該強度領域において経済的な調合設計に利用できる可能性が考えられた。
- 5) 但し、構造体コンクリートの強度発現性を模擬した簡易断熱養生ではシリカフェュームの反応率が比較的大きいにも係わらず、水中養生した場合に比べて同じシリカフェューム反応率では総細孔容積は大きく圧縮強度が低下しており、その要因としてはセメントの水和反応が他の水中養生に比べて乏しいことが考えられた。

#### 参考文献

- 1) 陣内 浩ほか：設計基準強度  $150\text{N/mm}^2$  の低収縮型高強度コンクリートの製造と施工，セメント・コンクリート，No.723，pp.18-24，2007.5
- 2) 三井 健郎ほか：設計基準強度  $150\text{N/mm}^2$  超高強度コンクリートによる超高層集合住宅の施工，セメント・コンクリート，No.723，pp.25-31，2007.5
- 3) 河上 浩司ほか： $150\text{N/mm}^2$  級高強度コンクリートの強度発現に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1235-1240，2006
- 4) 都築 正則ほか： $150\text{N/mm}^2$  を超える超高強度コンクリートの各種性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.121-126，2007
- 5) 陣内 浩ほか：温水養生供試体による超高強度コンクリートの圧縮強度の評価に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.47-48，2006
- 6) 菅俣 匠ほか： $150\text{N/mm}^2$  級コンクリートの強度発現性に及ぼすシリカフェュームの反応率の影響，コンクリート工学論文集，Vol.18，No.2，pp.1-11，2007.5
- 7) 今橋 太一：シリカフェュームを用いた超高強度コンクリート - その特性と性能 - ，セメント・コンクリート，No.619，pp.20-26，1998.9
- 8) 浅賀 喜与志ほか：セメント - 石英系水熱反応における未反応石英の定量，窯業協会誌 90，pp.397-400，1982
- 9) 渡邊 悟士ほか：高品質粗骨材選定技術による超高強度コンクリートの品質の安定化，コンクリート工学，Vol.45，No.2，pp.32-40，2007.2