

### 低水比領域におけるシリカフューム混和セメントペーストの水和反応特性

太平洋セメント(株) 正会員 ○三谷 裕二 番地 成朋 谷村 充  
名古屋大学大学院 正会員 丸山 一平

#### 1. はじめに

構造物の高層化・長スパン化などへの要求が高まり、設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートが実用化されている<sup>1)</sup>。超高強度コンクリートでは長期強度・流動性を確保するために、低発熱型のセメントにシリカフュームを混和することが多い。一方で、低水比領域では水和熱に伴う高温履歴を受けるため、構造体強度を適切に評価する上では、材齢初期に温度履歴を受けた場合の若材齢～長期材齢の強度発現メカニズムを明確にする必要があるものの、現状では不明な点が多い。本研究では、中庸熟ポルトランドセメントにシリカフュームを混和した水結合材比 20%以下のセメントペーストを対象に、材齢初期に高温履歴を受けた場合の強度発現について水和反応性(水酸化カルシウム量・シリカフューム反応率)の観点から検討した。

#### 2. 実験概要

**使用材料:**セメントには中庸熟ポルトランドセメント(密度 3.23g/cm<sup>3</sup>, ブレーン比表面積 3320cm<sup>2</sup>/g)を, シリカフュームには一般的に用いられているものより比表面積の小さいもの(密度 2.34g/cm<sup>3</sup>, BET 比表面積 10.1m<sup>2</sup>/g)を用いた。また, 混和剤には超高強度コンクリート用のポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。  
**配合:**セメントペーストの水結合材比(W/B)は 13, 16.5, 20%とし, セメントに対するシリカフュームの質量置換率は, W/B=13, 20%では 12.5, 17.5%, W/B=16.5%では 7.5, 12.5, 17.5%とした。

**養生条件:**図-1 に養生温度パターンを示す。W/B=13%には最高温度 80℃, W/B=16.5%には最高温度 70℃および 45℃, W/B=20%には最高温度 70℃の温度履歴を設けた。また, 全配合について 20℃一定の養生も設けた。

**作製供試体:**練混ぜは 20℃環境下で行い, 圧縮強度試験用としてφ5×10cm, 水と解析用として 70ml(ポリプロピレン製容器)の供試体を作製し, 試験材齢まで密閉した状態で養生した。

**試験項目および方法:**表-1 に実施した試験項目・方法および試験材齢を示す。

#### 3. 実験結果

1) 圧縮強度: 図-2 に圧縮強度の経時変化を示す。

いずれの W/B においても, シリカフューム置換率が大きいほど, 20℃下における材齢 1 日の圧縮強度は低い傾向にあり, シリカフューム置換に伴うセメント量の減少が影響していることが考えられる。一方, 45, 70, 80℃の温度履歴下では, シリカフューム置換率が大きいほど, 材齢 7 日以前の圧縮強度が高い傾向を示した。しかしながら, いずれの W/B, 養生条件においても, 材齢 91 日の圧縮強度はシリカフューム置換率の違いによって大差なかった。次に同一配合の強度発現を養生条件で比較すると, 高温履歴下の圧縮強度は材齢 7 日でほぼ最大に達しており, 材齢 7 日の強度は 20℃下と比較して W/B=13, 16.5, 20%でそれぞれ約 35, 30, 15%高かった。一方, 20℃下の圧縮強度は材齢 91 日まで増進する傾向が見られ, W/B=20%では材齢 28 日, W/B=16.5%では材齢 91 日において高温履歴を受けた場合の強度とほぼ同等となった。しかしながら, W/B=13%については, 材齢 91 日においても 20℃下の圧縮強度が高温履歴を受けた場合より 15%程度低かった。

2) シリカフューム反応率: 図-3 にシリカフューム反応率の経時変化を示す。いずれの W/B においても, 高温履歴を受けた場合のシリカフューム反応率は材齢 3~7 日ではほぼ最大に達し, その後はほとんど増加しなかった。これより, 高温条件下においてシリカフューム

キーワード: 超高強度コンクリート, シリカフューム, 強度特性, 水和反応特性, 温度依存性  
〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント中央研究所 TEL043-498-3804

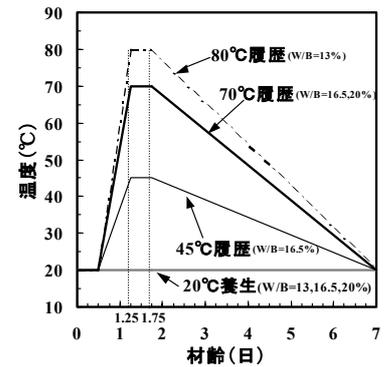


図-1 養生温度パターン

表-1 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	試験材齢(日)
圧縮強度	土木学会規準「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法 (JSCE-G505-1999)」 <sup>2)</sup> 準拠	1, 2, 3, 7, 28, 91
シリカフューム反応率	HCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 選択溶解法 <sup>3)</sup> により不溶残分を測定し, 測定結果からシリカフューム単体の不溶残分を補正して定量 試料作製方法: 3mmふるい全通に粗砕→7セツで水和停止→微粉碎→R. H. 15%乾燥	1, 1, 25, 1, 75, 2, 3, 7, 28, 91 *2日はW/B=16.5%のみ
水酸化カルシウム量	示差熱分析装置(TG-DTA)を用いて450℃付近の質量減量を測定 <sup>4)</sup> し, 水酸化カルシウム量を算出。試料はシリカフューム反応率と同じ	1, 1, 25, 1, 75, 2, 3, 7, 28, 91

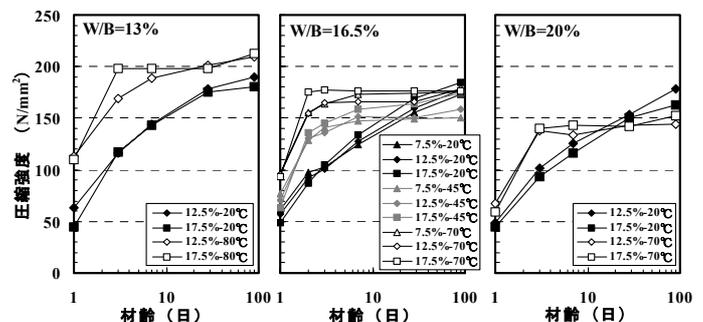


図-2 圧縮強度の経時変化

ームのポズラン反応が急速に進み、それが材齢初期の圧縮強度の増大に寄与していると考えられる。一方、20℃下におけるシリカフェームの反応率は長期にわたって緩やかに増加する傾向にあり、W/B=20%では、材齢91日の反応率が高温度履歴を受けた場合とほぼ同等となった。しかしながら、W/B=13, 16.5%では、材齢91日の反応率が高温度履歴を受けた場合より小さく、このことが、W/B=16.5 および 13%の20℃下の材齢91日強度が、高温度履歴を受けた場合と比較して同等あるいは低くなった結果の一因と推察される。

図-4 は圧縮強度と反応シリカフェーム量 (シリカフェーム置換率×シリカフェーム反応率) の関係を示す。同一配合における両者の関係は、W/B=13%ではばらつきがあるものの、W/B=16.5, 20%では概ね良く対応しており、養生条件に拘らず、圧縮強度と反応シリカフェーム量には直線的な関係が認められた。また、W/B と反応シリカフェーム量が同一の場合、シリカフェーム置換率が小さいほど圧縮強度は高く、これは置換率が小さいほどセメント量が多いためと考えられる。

3)水酸化カルシウム量：図-5 にセメントに対する水酸化カルシウム量 (質量比) の経時変化を示す。いずれの W/B においても、20℃下の水酸化カルシウム量は、材齢7日まで増加し、シリカフェーム置換率の違いによる差はほとんどなかった。また、材齢7~91日は緩やかに減少し、その減少量はシリカフェーム置換率が大きいほど増大する傾向が見られた。これは材齢7日以降において、シリカフェームのポズラン反応に伴う水酸化カルシウムの消費速度がセメントの水和反応による生成速度を上回り、特にシリカフェーム置換率が大きいほどポズラン反応で消費される量が多くなったためと考えられる。一方、高温度履歴を受けた場合は、W/B およびシリカフェーム置換率に拘らず、材齢1日程度から材齢3~7日までに水酸化カルシウム量が急激に減少しており、これは高温度下においてセメントの水和反応とシリカフェームのポズラン反応の双方が促進されるものの、ポズラン反応に伴う水酸化カルシウムの消費が卓越したためと推察される。また、高温度履歴後の材齢7日以降は、水酸化カルシウム量はほとんど減少しなかった。これはシリカフェーム反応率が材齢3~7日程度までに急速に進行し、その後は材齢91日まで微増となる上述の挙動と良く対応している。

図-6 に高温度履歴を受けた場合のセメントに対する水酸化カルシウム量と反応シリカフェーム量の関係を示す。シリカフェームの置換率に拘らず、両者には直線的な関係が認められた。

4. まとめ

中庸熱セメントにシリカフェームを混和した W/B=13~20%のセメントペーストについて、強度特性および水和反応性を検討した結果、①材齢初期に高温度履歴を受けた場合の圧縮強度は、材齢7日程度でほぼ最大に達する、②それとほぼ同時期(材齢7日)以降にシリカフェーム反応率および水酸化カルシウム量の変化が小さくなる、③養生条件によらず圧縮強度と反応シリカフェーム量には概ね良い相関性が認められた、ことが得られた。

参考文献：1)三井建郎ほか：設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup> 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.25-31,2007.3 2)土木学会,コンクリート標準示方書(規準編),pp.442-443,1999.11 3)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 4)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, pp.80-81, 2000.5

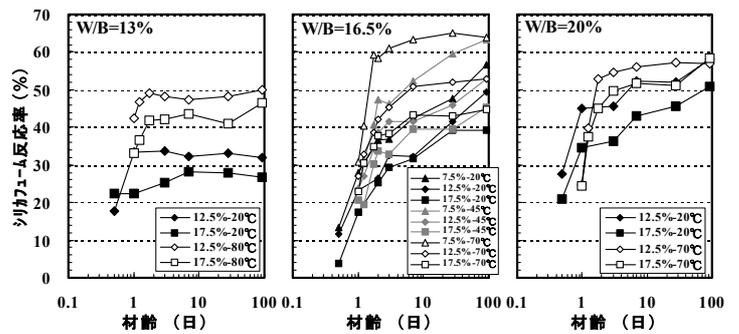


図-3 シリカフェーム反応率の経時変化

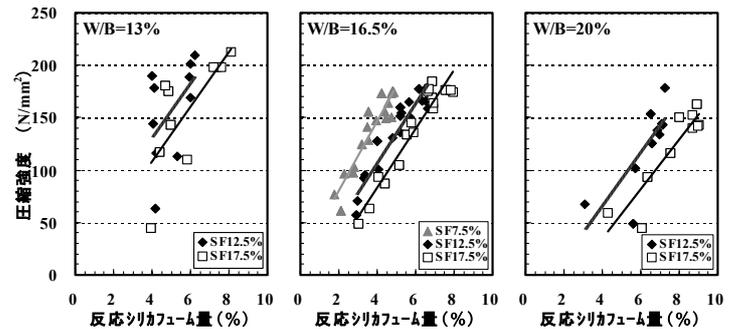


図-4 圧縮強度と反応シリカフェーム量の関係

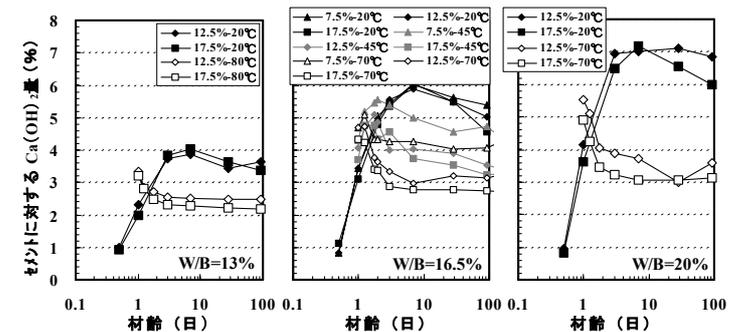


図-5 水酸化カルシウム量の経時変化

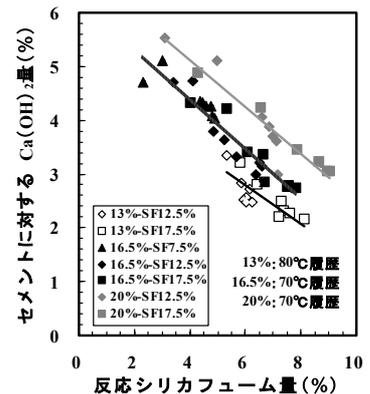


図-6 水酸化カルシウム量と反応シリカフェーム量の関係(高温度履歴)