

論文

[1039] シリカフェーム混入セメントペーストの高温履歴による強度発現特性と微細構造に関する実験的研究

正会員 ○ 大池 武 (大林組技術研究所)  
 正会員 中根 淳 (大林組技術研究所)  
 喜田 大三 (大林組技術研究所)  
 正会員 斉藤 裕司 (大林組技術研究所)

1. はじめに

コンクリートにおけるシリカフェームの強度改善効果は多くの研究例によって認められており、その機構<sup>1) 2)</sup>としてワーカブルになることによって水セメント比が低減できること、および骨材との境界領域のセメントペースト中にCa(OH)<sub>2</sub>がなくなることなどが上げられているが、その機構はまだ十分に解明されていない。また、その際の実験条件は標準水中養生である。

一方、高層RC用高強度コンクリートとしてシリカフェーム混入コンクリートを考えた場合、セメント量が多くなることおよび部材寸法が大きくなることから、マスコンクリートと同様に打込み後初期に高温履歴を受け、受けないものに比べて長期強度が小さくなるという報告<sup>3)</sup>がある。そこで、この事象の解明を意図し、本報では、シリカフェームを添加したセメントペーストに各種の温度履歴を与えたときの強度発現性状を調査するとともに、この強度発現性状とセメント硬化体の微細構造との関連について実験的に検討を加えた。

2. 実験概要

実験は、普通ポルトランドセメントにアイスランド産<sup>4)</sup>シリカフェームを内割り添加したセメントペーストで行ない、設計基準強度700kg/cm<sup>2</sup>程度の高強度コンクリートを想定し、水セメント比は30%とした。

実験の要因は、表-1示すように高温履歴の最高温度とシリカフェームの添加量とし、これらのすべての組み合わせについて実験した。なお、最高温度はプレクーリングも考慮している。

養生方法は、標準水中養生と高温履歴養生の2養生で、高温履歴養生は3種類とし、養生温度の実測結果と合わせて図-1に示す。なお、最高温度80℃のものは実際の夏季打設の柱部材の温度履歴<sup>3)</sup>を模擬した。

測定項目は、圧縮強度、水銀圧入法による総細孔量と細孔分布、熱分析法によ

表-1 実験要因と水準

要因	水準	備考
最高温度	3	40℃、60℃、80℃
シリカフェーム添加量	4	0%、10%、20%、30%

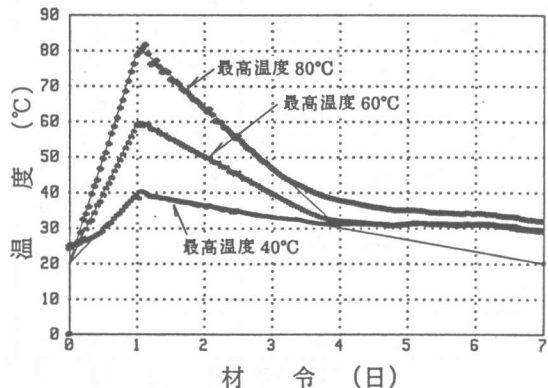


図-1 高温履歴養生の温度管理

る結合水量および窒素吸着法による比表面積測定などである。圧縮強度は、 $5\phi \times 10\text{cm}$ のシリンダーを用いた。また、総細孔量、細孔分布の測定は、圧縮強度試験終了後の供試体を砕き、 $2.5 \sim 5\text{mm}$ の範囲の試料を採取し、アセトンによって水和を止め、真空乾燥して試験に供した。結合水量および比表面積の測定は、同じ処理を施した後、 $200$ メッシュ以下に微粉碎し試験に供した。また、各試験は、材令3日、1週、4週および13週の4材令で行なった。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 強度発現性状

実験結果は、シリカフェーム添加量と最高養生温度との関係で整理して図-2に示した。

標準水中養生強度は、シリカフェームの添加の有無、添加量の違いにかかわらず、材令の経過にとまぬ強度が増加している。シリカフェーム添加による強度改善効果は材令4週以後で認められるが、材令13週で、添加量10%および20%で5~6%程度と小さく、顕著な効果は認められない。添加量30%ではいずれの材令でも無添加の標準水中養生強度を下廻っている。

温度履歴養生強度では、シリカフェーム無添加のものは、最高温度が高くなるにつれて初期強度は大きい、材令の経過に伴う強度の伸びが小さく、材令4週、13週では最高温度 $60^\circ\text{C}$ 以上で、標準水中養生強度より小さくなっている。これは、既往の実験結果<sup>5) 6)</sup>と一致する。

一方、シリカフェーム添加量が10%、20%の強度は、いずれの材令でも無添加の強度を上廻っており強度改善効果が認められる。特に、添加量が10%のものは、最高温度が $80^\circ\text{C}$ であっても材令4週以降の強度の伸びが大幅に見られ、材令13週強度は、標準水中養生強度と同等以上の強度を示している。なお、高温履歴を受けた場合の強度の伸びは、最高温度が低いほうが若干大きいと言える。このように、高温を履歴したものが、標準水中養生と同等以上の強度を示すことはシリカフェームを混入したセメントペーストに特有の現象と考えられ、コンクリートでの類似の研究例<sup>3)</sup>とは逆の傾向を示し、この差異の解明は今後の検討課題である。

#### 3.2 微細構造と強度発現性状

##### 3.2.1 総細孔量と強度発現性状

筆者らは、フライアッシュ混入中庸熱セメントペーストを用いた実験で、総細孔量と強度との

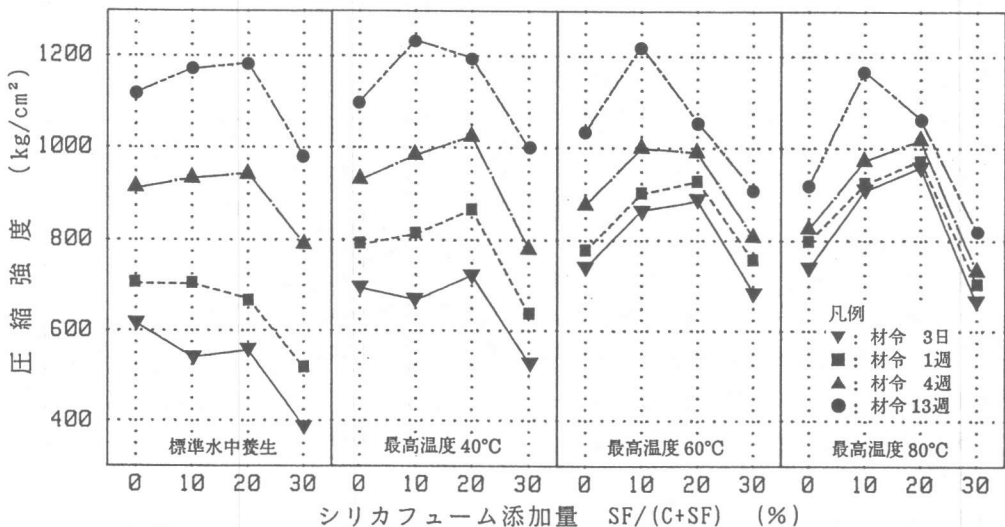


図-2 強度発現性状

間に高い相関関係が認められ、総細孔量の推移から強度発現を説明できると報告<sup>5)</sup>している。そこで、図-3に、シリカフューム添加の有無ごとの総細孔量と強度の関係を示した。

図から、添加の有無にかかわらず、総細孔量の減少に伴って強度が増大していく様子が分かる。しかし、添加した場合は両者のバラツキが無添加に比べて大きく、同じ総細孔量であっても圧縮強度には300kg/cm<sup>2</sup>程度の差があり、この差を総細孔量のみで説明することはできない。

このように、総細孔量はシリカフュームを添加したセメントペーストの強度発現を大まかに説明できる程度である。

### 3.2.2 細孔分布と強度発現

24Å~1400Åの範囲で整理した細孔分布の一例を図-4に示す。

図から、シリカフューム無添加の標準水中養生の細孔分布は、材令の経過に伴い細孔径が微細な径に移行し、24~100Åの範囲の細孔量も小さくなっている。しかし、同じく無添加の最高温度80℃のものは、材令の経過に伴い微細な径に推移していくが、24~100Åの範囲の細孔量は少なくなっていない。

次に、シリカフューム添加量10%のものは、標準水中養生、最高温度80℃の高温履歴養生とも、無添加の標準水中養生と同様な推移を示している。

これらの傾向は、それぞれの強度発現性状と対応しており、細孔分布の推移と強度発現機構とが関連していることを示唆している。

### 3.2.3 結合水量と強度発現

図-5に結合水量と強度の関係を示す。

図から、シリカフュームが無添加の場合、既報<sup>5)</sup>と同様にややバラツキが認められるものの、結合水量の増大に伴って強度は増大する傾向が明確に認められ、両者は高い相関関係( $r=0.92$ )にあることが分かる。この事象は従来から言われているように、セメントの水和が進み、水和物量が増えることによって強度が増大していくこ

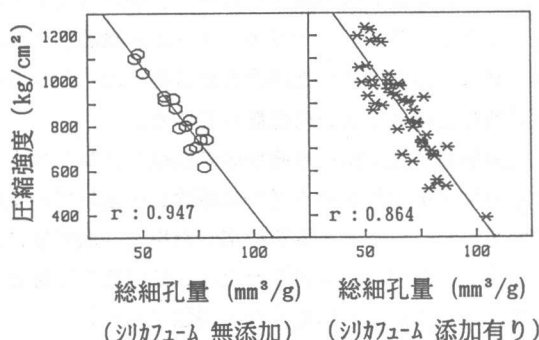


図-3 圧縮強度と総細孔量の関係

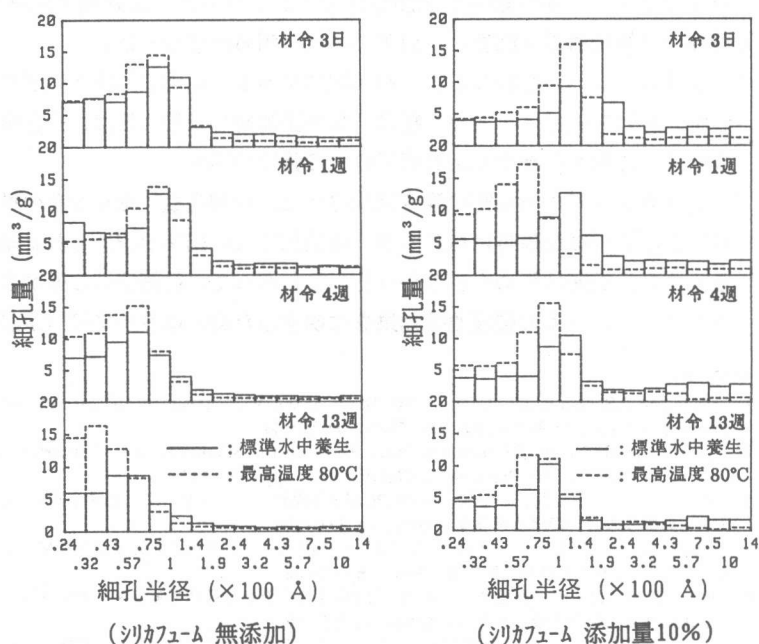


図-4 細孔分布の推移の比較

とを示している。

次に、シリカヒュームを添加した場合は無添加に比べてやや異なる。10%添加の結果を例示するように、やはり結合水量の増大に伴って、強度は増大する傾向は認められるものの、バラツキが非常に大きく、両者の間に相関関係が認められない。

上記のように、シリカヒュームを添加した場合の強度発現は無添加の場合と異なり、単に結合水量からでは説明できずそれ以外の要因も考慮する必要があり、その要因の解明は今後の課題である。

### 3.2.4 比表面積と強度発現

比表面積と強度の関係を図-6に示す。

図から、比表面積の減少に伴って、強度は増大する傾向が認められる。その際、シリカヒュームが無添加の場合と、シリカヒュームを添加した場合とに区分され、シリカヒュームを添加した場合が上方に位置している。

比表面積の減少に伴う強度の増加はセメントの水和に伴う水和組織の緻密化という従来の概念と一致しているが、同じ強度でもシリカヒュームを添加した場合、無添加に比べて比表面積が大きい結果が得られたことは当初の予想とは相反しており、この点の解明も今後の課題である。

## 4. まとめ

シリカヒュームを内割りで添加したセメントペーストに各種の温度履歴を与えて、その強度発現性状と微細構造を調査し、以下のことが明らかになった。

- 1) シリカヒュームを10%および20%添加すると、無添加に比べいずれの材令でも、強度は大きい。30%では逆に小さい。特に、10%添加時の13週強度は、高温履歴を受けても無添加とは異なり、標準水中養生強度と同等以上の強度を示す。
- 2) シリカヒューム添加時の強度発現性状は、総細孔量、細孔分布の推移および比表面積の減少程度とある程度関係付けられるが、無添加でよい相関が認められた結合水量ではバラツキが大きくなり、相関は認められなかった。したがって、微細構造の面からセメントペーストにおけるシリカヒュームの強度改善効果を説明するためにはさらに検討が必要である。

### 参考文献

- 1) Shondeep L.Sarkar et al : Comparative Study of the Microstructures of Normal and Very High-Strength Concrete, Cement, Concrete, and Aggregates, 9, 1987, pp 57~64
- 2) A.Benur et al : Effect of Condensed Silica Fume on the Microstructure of Interfacial zone in Portland Cement Mortars, J. Am Cram Soc, 70[10], 1987, pp 738~743
- 3) 中根 淳、久保田昌吾、一瀬賢一ほか: RC超高層建物用コンクリートに関する研究 (その3~その6)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1988, pp 293~300
- 4) 中根 淳、久保田昌吾、一瀬賢一: シリカヒューム混入コンクリートの強度性状に関する研究、第9回コンクリート工学年次論文集、1987, pp 51~56
- 5) 喜田大三、中根 淳、斉藤裕司、大池 武: 微視的構造から見た高強度マスコンクリートの強度発現機構、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989, pp 821~822
- 6) 例えば、高野俊介: 打込み温度がマスコンクリートの強度に及ぼす影響の検討、土木学会論文報告集、第26号、1955, pp 1~40

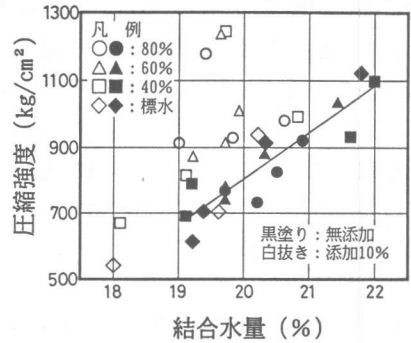


図-5 結合水量と強度の関係

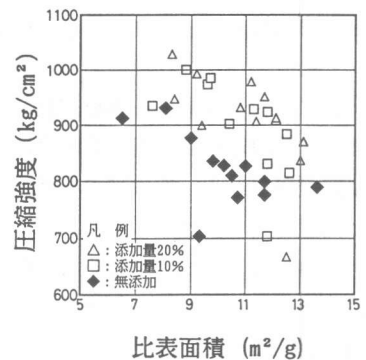


図-6 比表面積と強度の関係