

## 水セメント比およびシリカフューム添加率に着目した オートクレーブ養生の低温化に関する研究

日大生産工(院)○岩崎 直郁 日大生産工 山口 晋  
日大生産工 伊藤 義也 日大生産工 鶴澤 正美

### 1. はじめに

コンクリートのオートクレーブ養生は、構造物の地中杭をはじめとした高強度コンクリート二次製品を製造するにあたり広く一般的に用いられているコンクリート高強度化手法の一つである。現在では、圧縮強度 150N/mm<sup>2</sup>級の研究も行われている。<sup>1)</sup> オートクレーブ養生は、約 180°C-1MPa という高温・高圧蒸気養生により養生直後に所要の高強度が得られ、早期出荷を可能とする大きな利点がある。しかし、オートクレーブ養生は大型養生装置を用い、重油をはじめとした多くの化石燃料を消費し、多量の CO<sub>2</sub> を排出するため、環境負荷低減ならびに製造コストの削減の観点から、これら課題の解決が急務とされている。

そこで研究者らは、オートクレーブ養生温度の低温化により消費する熱エネルギーを抑制することで環境への負荷および化石燃料消費量を軽減する新しいオートクレーブ養生方法に関する研究を開始した。これまでの研究成果より、高活性なシリカフュームの添加ならびに、十分な前置き養生時間を確保することでオートクレーブ養生温度の低温化が十分可能である知見を示している。<sup>2)</sup> しかし、これらの知見は、セメントとシリカフュームが予め規定量混合されたプレミックス粉体を用いたものであり、土木学会「超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)」<sup>3)</sup> に準拠した標準材料・配合で検討したものである。そのため、オートクレーブ養生温度低減化技術の確立には、実製造を考慮したコンクリート配合の導出が必要となるため、その基礎的

実験として、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比に関する検討および、低温化技術に有効となるシリカフュームの添加量が、強度発現性に及ぼす影響に関する検討が必要であると考えた。

本研究は、水セメント比およびシリカフューム添加率に着目し、一般的に行われている 180°C および 150°C, 130°C の低温度領域でオートクレーブ養生を実施したモルタルの強度発現性および細孔空隙、微細構造について実験検討を行ったものである。

### 2. 実験方法

#### 2-1. 使用材料および配合

使用材料は、セメント(密度:3.16g/cm<sup>3</sup>)、シリカフューム(密度:2.3g/cm<sup>3</sup>, 平均粒度 1 μm)、けい石微粉末(密度:2.66g/cm<sup>3</sup>, 平均粒度 6 μm)、珪砂(密度:2.66g/cm<sup>3</sup>, 平均粒度 0.8~0.3 μm)、高性能 AE 減水剤を使用した。なお配合は、Table. 1 に示す通りである。

Table. 1 配合表

W/C	SF additive rate	kg/m <sup>3</sup>					
		W <sup>*</sup>	C	SF	Q	S	SP <sup>*</sup>
30%	0%	195	650	0	294	1300	32.5
	10%			65	219		
	20%			130	144		
40%	0%	260	650	0	284	1138	5.2
	10%			65	209		
	20%			130	133		
50%	0%	325	650	0	273	975	0
	10%			65	198		
	20%			130	123		

※W:Water+SP

Study on low-temperature autoclave curing

focusing on Water-cement ratio and Silica fume additive rate

Naofumi IWASAKI, Shin YAMAGUTI, Yoshinari ITOH, Masami UZAWA

W/C は、30、40、50%の3水準、シリカフューム添加率は、0、10、20%の3水準とした。なお、シリカフュームはC×%で添加し、セメント量一定でけい石微粉末と置換した。

## 2-2. 供試体作製

練混ぜは、5ℓのモルタルミキサー(JIS R 5201)を使用し、W/C30%は低速3分間、高速4分間で練混ぜを行い W/C40、50%は低速2分間、高速3分間で練混ぜを行った。練混ぜ終了後、φ50×100mm のスチール製型枠に流し込み、打設面にラップを被せ、濡れウエスで覆い前置き養生を行った。

## 2-3. 養生方法

脱型前の前置き養生時間は、本研究に有効となる72時間と一定にした。<sup>2)</sup>次に、脱型を目的とした65°C4時間の常圧蒸気養生を行った後、180、150、130°Cでそれぞれ3時間保持したオートクレーブ養生を開始した。

## 2-4. 試験方法

### 2-4-1. 圧縮強度

圧縮強度試験は、JSCE-G505-1999「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」に準拠した。

### 2-4-2. 細孔空隙測定

細孔空隙測定は、オートクレーブ養生後の供試体からダイヤモンドカッターを用いて約3~5mmの試料を切り出し、直ちにアセトン浸漬により水和を停止した後、D-乾燥を実施したものを解析試料とした。なお、用いた装置は、M社製の水銀圧入式ポロシチメーターを用いた。この装置の細孔測定直径範囲は、100μm~0.003μmである。

### 2-4-3. 微細構造

#### (1) 粉末X線回折

高強度化には必須とされているトバモライトの分析には、R社製の粉末X線回折装置を用いた。走査範囲は5~15°(2θ, CuKα)で走査速度2°/minとした。

## (2) 走査型電子顕微鏡

微細構造の観察には、N社製のJCM-5700型の走査型電子顕微鏡を用いた。観察は、3視野3倍率(×3000, ×5000, ×10000)を行った。なお、試料は(1)で述べたものを用いた。

## 3. 試験結果及び考察

### 3-1. 圧縮強度に関する検討

Fig. 1に圧縮強度試験結果を示す。水セメント比がどの場合においても、養生温度に比例して圧縮強度は増加し、W/C30%が最も圧縮強度が高い結果となった。次に、シリカフュームの添加率を変えた場合は、添加率が大きい程圧縮強度は高くなる傾向が顕著で、また、オートクレーブ養生温度が高い程SF0%に対する強度増加の割合が高くなる傾向が認められた。

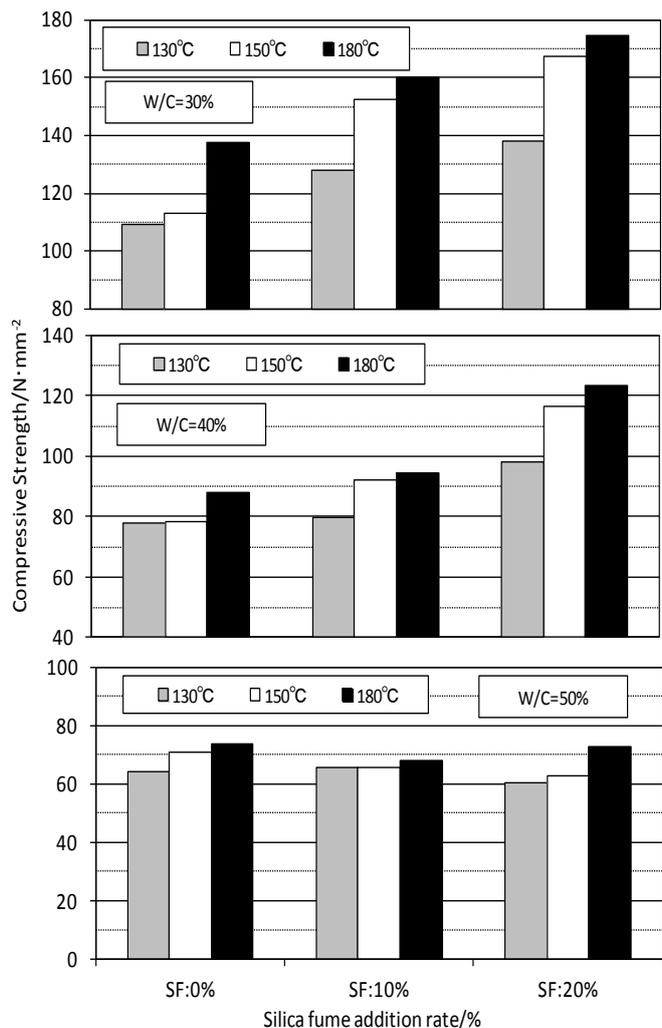


Fig. 1 圧縮強度結果

しかし、W/C50%の場合は、シリカフュームの添加量を変えても、その影響は小さかった。

そこで、シリカフューム添加率の影響が大きいW/C30、40%の場合について、それぞれの圧縮強度が高いシリカフューム20%の場合に対する圧縮強度比をTable. 2に示す。この結果によれば、シリカフュームを混入した10、20%の場合、オートクレーブ養生温度が150℃の場合においても0.95~0.97と高く、一般オートクレーブ養生温度180℃とほぼ同等圧縮強度比が認められた。これに対し、シリカフューム0%およびオートクレーブ養生温度が130℃の場合では、0.90以下と強度比は低い結果となった。

以上のことは、これまで得られている知見<sup>2)</sup>、すなわちシリカフューム添加の有効性を裏付けるものであり、製造コスト等の実製造を視野に入れる場合、シリカフュームの添加率は10%程度とするのが良いことを示すものである。

### 3-2. 微細空隙に関する検討

Fig. 2に全空隙量と圧縮強度の関係を示す。これまでの研究成果<sup>2)</sup>でも得られている全空隙量が少ない程圧縮強度が高くなる一般的な傾向を示したが、W/C30%の場合とW/C40、50%の場合で異なる傾向を示した。

Table. 2 圧縮強度比率

W/C (%)	additive rate (%)	Temperature (°C)	compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	strength development
30	0	130	109.3	0.80
		150	113.1	0.82
		180	137.4	1.00
	10	130	127.9	0.80
		150	152.6	0.95
		180	160.1	1.00
20	130	138.3	0.79	
	150	167.1	0.96	
	180	174.8	1.00	
40	0	130	77.9	0.88
		150	78.2	0.89
		180	88.1	1.00
	10	130	79.9	0.85
		150	92.0	0.97
		180	94.4	1.00
	20	130	98.1	0.79
		150	116.3	0.94
		180	123.5	1.00

そこでFig. 3に、本研究範囲で最も高強度となるW/C30%の場合における全空隙量および3-6nmのゲル空隙量と圧縮強度の関係を示す。まず、全空隙量と圧縮強度の関係は、シリカフュームの添加率に関わらず、前述で述べた通り全空隙量の減少に伴い圧縮強度の増加する傾向が認められたが、シリカフュームの添加率が0%の場合、10、20%に比べてその傾向が顕著であった。

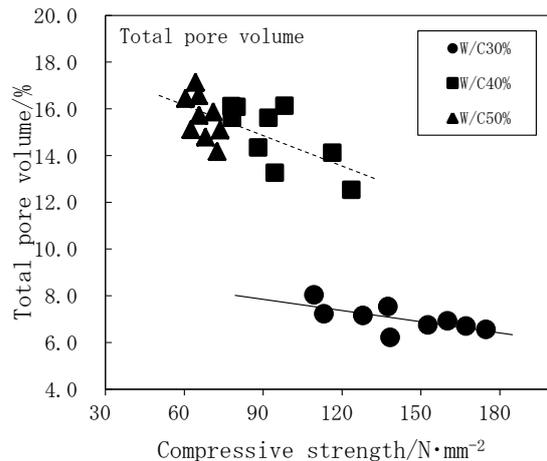


Fig. 2 全空隙率と圧縮強度の関係

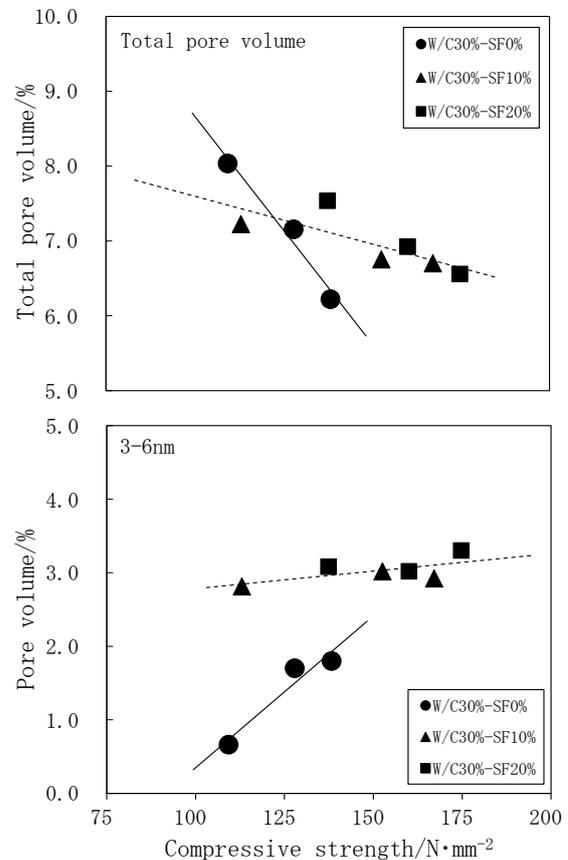


Fig. 3 各空隙量と圧縮強度の関係

次に、3-6nm のゲル空隙量と圧縮強度の関係は、ゲル空隙量の増加に比例して圧縮強度が増加する傾向が顕著であったが、全空隙量の場合と同様にシリカフュームの添加率が0%と10、20%の場合では異なる挙動を示した。

これは、研究成果で明らかにしているシリカフュームのポズラン反応によって成長したゲルによりゲル空隙量が増加し、全空隙量が減少したことによる緻密化によるものと考えられる。しかし、低水比の領域では異なる挙動を示すことがわかった。

### 3-3. 微細構造に関する検討

Fig. 4 に粉末 X 線回折結果を示す。Fig 4 に記す  $7.8^\circ$  付近の線は、オートクレーブ養生による高強度化には必須とされる結晶性のケイ酸カルシウム水和物であるトバモライトに対応する回折角度であるが、本研究範囲では、その回折が確認できなかった。そこで、Fig. 5 に走査型電子顕微鏡による観察画像の一例を示す。前述で述べたトバモライトは認められず、C-S-H が認められた。その形態は、養生温度が高くシリカフュームの添加率が高い程細かく密になる傾向が認められ、これまで得られている知見の通り、C-S-H が高強度に大きく寄与していることを示すものである。

### 4. まとめ

本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 水セメント比およびシリカフューム添加率に関わらず、養生温度に比例して圧縮強度は増加した。ただし、材料費を含む実製造を考慮した場合、低水比の30%並びにシリカフューム添加率は10%程度が良いことを示した。
- 2) シリカフュームのポズラン反応によってゲル空隙量が増加し、全空隙量が減少したことにより緻密化するが、水セメント比によっては異なる挙動を示すことを明らかにした。
- 3) 本研究範囲ではトバモライトが高強度化の必須条件ではなく、C-S-H が支配的要因となることを示した。

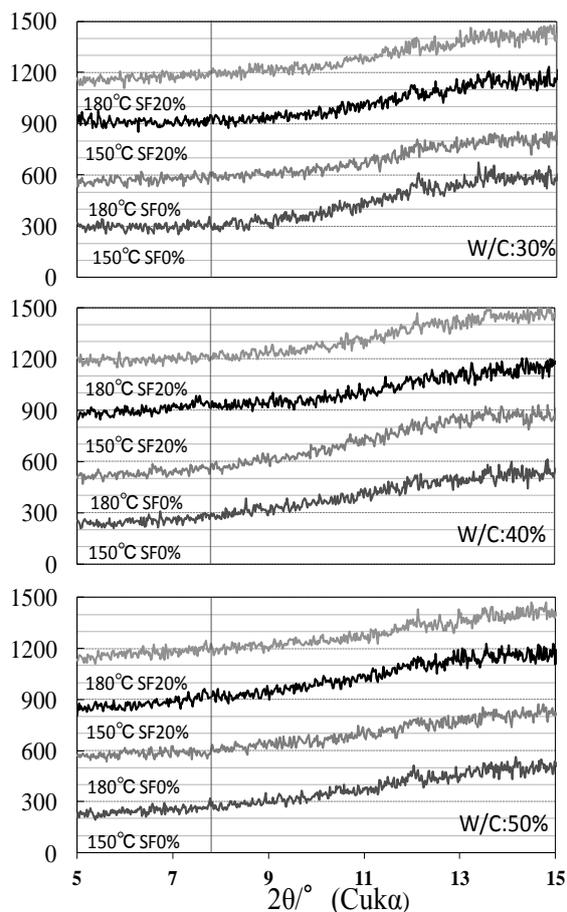
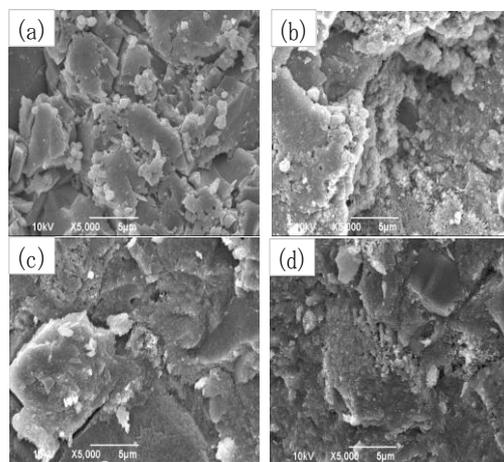


Fig. 4 粉末 X 線回折結果



(a):150°C-SF0%, (b):150°C-SF10%  
(c):180°C-SF0%, (d):180°C-SF10%

Fig. 5 走査型電子顕微鏡観察画像

### 「参考文献」

- 1) 管一雅, 榊田佳寛, 石川一真, 日本コンクリート工学年次論文集, 28, 1, 635-640 (2006).
- 2) 山口晋ほか, 無機マテリアル学会誌, 18, 254-259 (2011).
- 3) 「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」土木学会 (2004)