

報告 300MPa級の超高強度コンクリートの強度発現機構に関する研究

水田 実^{*1}・田中 孝典^{*2}

要旨：本研究は、300MPa 程度の超高強度コンクリートを作製するための各種養生方法に着目し、コンクリートの強度発現機構を定量的に把握することを目的に検討を行ったものである。研究の結果、温水養生が高強度に与える影響が最も大きく、加圧養生による影響度は比較的顕著であることが明らかとなった。また、温水養生、加熱養生及び加圧養生を最適条件化で組み合わせることによって、300MPa 程度の超高強度コンクリートを容易に作製することが可能となった。

キーワード：超高強度コンクリート、圧縮強度、温水養生、加熱養生、加圧養生

1. はじめに

セメント・コンクリート硬化体の圧縮強度に関する理論は、一般的に言えば水セメント比説、空隙比説などの経験則としての空隙率（ポロシティ）依存則に基づくものである^{1),2)}。この理論を基に、コンクリートの高強度化に関する研究は、様々な研究機関において高強度コンクリートの基礎的な実験が数多く行われ、相当数の報告がなされている^{3),4),5)}。しかし、高強度化手法の各種養生方法についての作用機構を詳細に検討した報告は数少なく^{6),7),8)}、不明な点が多く存在する。

そこで本実験は、300MPa 程度の超高強度コンクリートを作製するための各種養生方法に着目し、コンクリートの強度発現機構を定量的に把握することを目的に検討を行ったものである。また、コンクリートの超高強度化のための調査、シリカフューム（以下、SF という）置換率、加圧成形法並びに各種養生方法を組み合わせた条件と圧縮特性について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験では、超高強度化手法の最適条件を検討するために、材料の投入順序を変えた2種類の混練方法、SF 混入量を 0%・10%・25%・40%と変化させたもの及び気中・水中・温水・加熱・加圧養生など各種の養生方法を組み合わせた実験を行った。

2.2 コンクリートの調査

モルタルとコンクリートの基準調査を表-1に示す。本実験で使用した材料は、セメントに普通ポルトランドセメント（記号：C、密度 3.15g/cm³、比表面積 3410cm²/g）、混和材として SF（密度 2.35g/cm³、比表面積 14.1m²/g、SiO₂ 含有量 93.8 %）を使用した。細骨材（記号：S）には、最大粒径 5mm、表乾密度 2.54g/cm³、

表-1 モルタルとコンクリートの基準調査

調査 No	種類	水結合 材比 (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	SF	S	G	SP
1	モルタル (Ma)	20	220	825	275	1100	0	66
2	モルタル (Mb)	14	154	825	275	1100	0	66
3	コンクリ ート(C)	20	147	550	185	590	880	44

*1 麻生工科デザイン専門学校 建築学科 工修（正会員）

*2 大分工業高等専門学校 都市システム工学科講師 工博

吸水率 2.3 %の安山岩系砕砂を、粗骨材(記号 : G)には粒形 5 ～ 20mm, 表乾密度 2.60g/cm³, 吸水率 1.47 %の安山岩系碎石を用いた。化学混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤(記号 : SP)及びポリエーテル系の空気量調整剤を使用した。また、練混ぜ水には上水道水(記号 : W)を使用した。

2.3 混練方法

モルタル・コンクリートの練混ぜには、容量 100 l の 1 軸強制練りミキサを使用した。混練法 A の粉体混練とは、粉体であるセメントと SF を最初に空練りし、その後に細・粗骨材と水及び高性能 AE 減水剤を投入し練混ぜたものである。また、混練法 B のスラリー混練とは、水と SF 及び高性能 AE 減水剤をあらかじめ別の容器で 300 分間ハンドミキサで攪拌し、その後にセメントと細骨材を混練し、粗骨材を投入し練混ぜたものである。なお、練混ぜ時間については、既報の研究⁹⁾を参考に、SF を混和したコンクリートは、練混ぜ時間を増大させることにより、圧縮強度が高くなることが確認されているため、本実験では、高強度化の重要な要因である SF の分散性を高めるために、一般的な高強度コンクリートの練混ぜ時間より長く混練を行った。以下の図-1 に混練方法 A・B を示す。

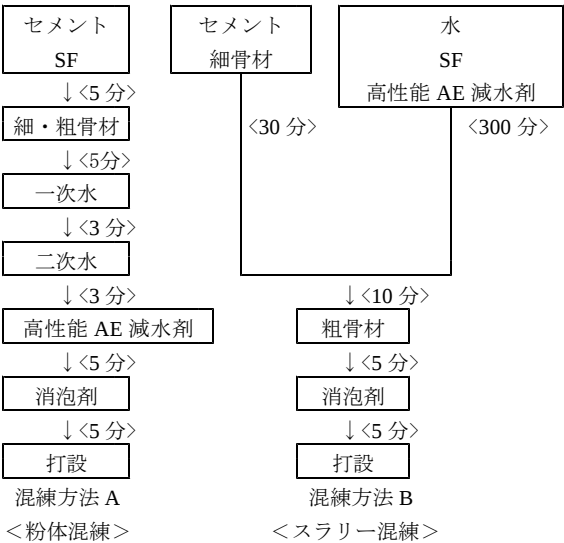


図-1 混練方法

2.4 養生方法

気中養生は、温度 20 ℃, 湿度 60 %の一定に保たれた恒温恒湿室で養生を行った。温水養生は、断熱材で被覆した容器に熱源を取り付けたものを作製し、温水温度 60 ℃, 80 ℃で 1, 3, 7 日間の養生を行った。加熱養生は、電気ワッフル炉を用い加熱温度 100 ℃, 150 ℃, 200 ℃で 1, 3, 7 日間の養生を行った。加圧養生は、5000KN アムスラー万能試験機を用い、図-2 に示した特注鋼管型枠にモルタル・コンクリートを打設した。また、加圧力 49MPa, 98MPa, 147MPa で載荷速度を 4.9MPa/分, 2.45MPa/分, 1.63MPa/分と変化させ、24 時間経過後、脱型を行った。

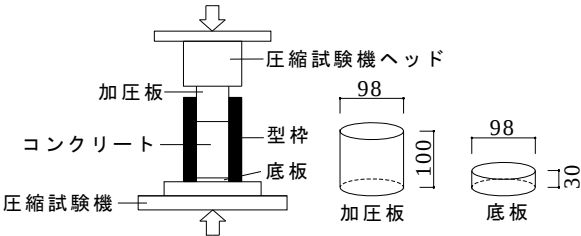


図-2 加圧養生

3. 実験の結果と考察

3.1 混練方法の違いによる諸物性

混練方法の違いによる諸物性を表-2 に示す。これによると、材齢 7 日における圧縮強度は、混練法 B のスラリー混練の方が大きくなった。これは、あらかじめ SF を高性能 AE 減水剤と十分混練したことで、SF が良く分散できたものと考えられる。また、SF が均一に分散することでモルタル中の水酸化カルシウムと良好なポズラン反応を起こし¹⁰⁾, より緻密な内部組織を形成することができたと考えられる。なお、この検

表-2 混練方法の違いによる諸物性

種類	調合 No	使用セメント	材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	フロー値 (mm)
混練法A	2	早強セメント	7	108.6	163*165
混練法B	2	早強セメント	7	139.7	207*214

<養生方法> : 打設→脱型→温水養生 (80 ℃で 3 日間) →気中養生 (3 日間) →圧縮強度試験

討の結果、混練法 B の方が混練法 A より高強度を得られることが確認できたため、本実験の試験体は混練法 B を基準に検討を行った。

3.2 モルタル及びコンクリートの圧縮特性

コンクリートの結合材であるセメントペーストの高強度化のためには、毛細管空隙と潜在空隙の空隙から成る直径 10mm 以上の空隙を効果的に減少させる必要がある¹⁾。そのため、セメントペーストの空隙を減少させるためには、水セメント比の低減と水和物量の増加による毛細管空隙の減少、並びに成形法の工夫と他材料の充填による空隙の減少が有効であると考えられる。図-3には、モルタル及びコンクリートの強度発現曲線を示す。試験体の養生方法は、型枠脱型後、所定の材齢まで水中養生を行ったものである。これによると、初期材齢においては水結合材比が 14 %のモルタル Mb の圧縮強度が大きく、水結合材比が 20 %のモルタル Ma 及びコンクリートの圧縮強度は小さい値を示している。これは、初期材齢での強度がセメントの水和反応に使用されない自由水と水和空間の大きさに支配されるため、セメントペーストの強度、すなわち水結合材比によって決まることになるからである。また、材齢 28 日におけるコンクリートの強度がモルタルより大きくなった理由は、100MPa 程度の強度のモルタルより、もっと強固な骨材が体積比で沢山混合されていたからだと考えられる。しかし、高強度・超高強度コンクリートになれば、骨材自体が破壊する割合が大きくなり、それ以上の強度増進は期待できないものと考えられる。

3.3 SF混入量の影響

SF 混入量と圧縮強度との関係を図-4に示す。試験体の養生方法は、型枠脱型後、所定の材齢まで水中養生を行ったものである。これによると、SF 混入量が 10 %の場合に最大強度を示し、これ以上に混入量を増量しても圧縮強

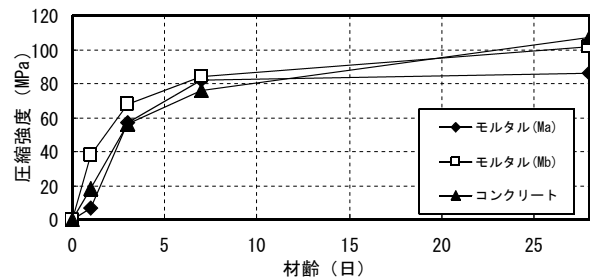


図-3 モルタル及びコンクリートの強度発現曲線

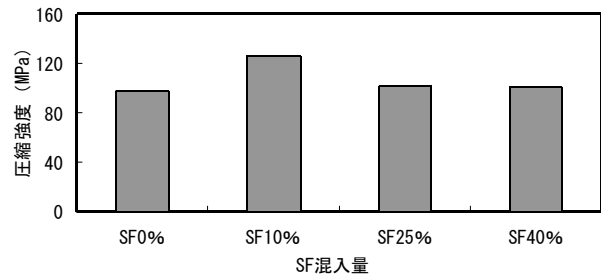
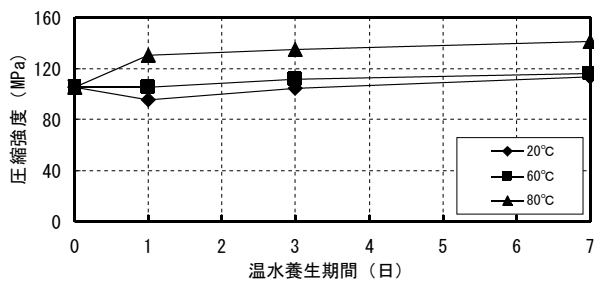


図-4 SF混入量の影響

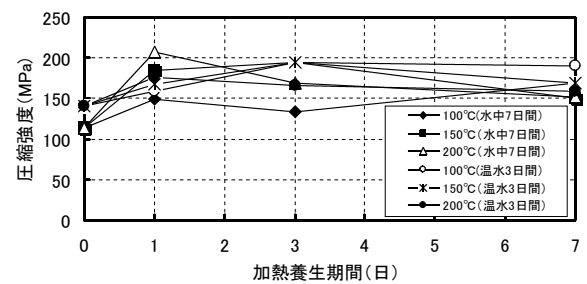
度の増加は見られなかった。つまり、SF 混入量が増加するほど SF が凝集する傾向にあり¹¹⁾、安定的に分散性を高めることは困難であると考えられる。

3.4 温水養生の影響

温水養生と圧縮強度との関係を図-5に示す。これによると、温水温度 80 °C の場合は養生期間が長いほど強度は大きくなり、温水温度 60 °C では緩やかな強度上昇を示した。また、温水養生と水温 20 °C の水中養生を比較したところ、水中養生を行った場合は、まず強度低下を生じてからやがて強度上昇に転ずる傾向が見られた。これは、本実験のように単位セメント量が著しく大きい富調合であれば、セメントの水和反応に伴う発熱量が極めて大きくなり、この水和熱の温度よりも低温で養生を行えば、水和反応の進行を抑制するものと考えられる。すなわち、水和反応時に発生する水和熱を上回る温度で養生を行えば、促進養生状態となり強度が上昇すると考えられる。



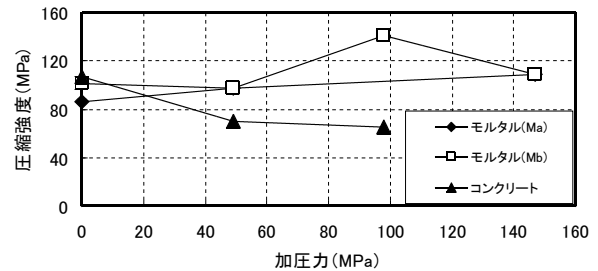
図－5 温水養生の影響



図－6 加熱養生の影響

3.5 加熱養生の影響

超高強度コンクリートの細孔構造は極めて緻密であるため、硬化体内部における水分が外部に逸散しにくいといわれている¹²⁾。そのため、超高強度コンクリートに対して加熱養生を行うと硬化体内部の水分が蒸発し、高温高压な水蒸気となり、この水蒸気がセメントの水和反応とSFのポズラン反応を促進させることになるかと推測される。そこで本実験では、7日間の水中養生後または、3日間の温水養生後に加熱養生を行った場合の影響についても検討を行った。図－6にその結果を示す。これによると、加熱温度200℃の場合は加熱期間1日で最大強度を示し、同様に加熱温度150℃の場合では加熱期間が3日、加熱温度100℃の場合は加熱期間が7日で最大強度を示した。このように、加熱温度が高いほど最大強度を示す加熱養生期間は短くなり、それ以降は養生期間が長くなっても圧縮強度が低下する傾向が見られた。これは、セメント硬化体中の水分がセメントの水和反応に消費されたにもかかわらず、必要以上の加熱を行えば、脱水された表面部分から徐々に微細なクラックを生じ、強度低下を招いたと考えられる。また、水中養生と温水養生を行った後に、加熱養生した場合の影響については、水中養生の方が加熱養生による強度増進効果が増大する傾向が見られた。これは、水中養生から加熱養生を行う場合の方が、温水養生から加熱養生を行う場合に比べて、硬化体中に含まれる未水和セメ



図－7 加圧養生の影響

ント量が多く存在していたために、加熱養生による強度増進効果が大きくなったと考えられる。

3.6 加圧養生の影響

加圧力と圧縮強度の関係を図－7に示す。また、加圧時の載荷速度は2.45MPa/分を基準とした。これによると、モルタルMaとMbの圧縮強度は、加圧力の増大とともに強度が上昇する傾向が見られた。これは、加圧することにより加圧板と底板との隙間から余剰水が搾り出され、モルタル内部の組織を緻密にしたためと考えられる。また、加圧力が49MPa程度ではモルタル内部の余剰水を十分に搾り出すことができず、逆に147MPaでは加圧力のかけ過ぎによって骨材自体が破壊していると考えられる。

3.7 回帰分析による評価

各種養生方法を組み合わせた条件と圧縮特性に関する実験結果を表－3に示す。また、本実験で対象とした各種養生方法の影響度を検討するため、回帰分析を行い超高強度コンクリートの強度に及ぼす影響度を分析した。なお、回帰分析にあたっては各養生データの個数など、デ

表-3 各種養生方法を組み合わせた条件と圧縮特性

養生方法	調合種類	気中養生 (20℃)	水中養生 (20℃)				温水養生 (60℃)			温水養生 (80℃)			加熱養生 (100℃)			加熱養生 (150℃)			加熱養生 (200℃)			加圧養生 (24時間)					圧縮強度 (MPa)		
																						49MPa	98MPa	147MPa					
			1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	1日	3日	7日	1日	3日	7日	1日	3日	7日	1日	3日	7日	2.45MPa /分	2.45MPa /分	4.9MPa /分	2.45MPa /分	1.63MPa /分			
A	Ma				●																								86.3
	Ma				●																●								97.2
	Ma				●																				●				109.3
	Mb				●																								101.5
	Mb				●																●								97.1
	Mb				●																	●							130.8
	Mb				●																		●						135.7
	Mb				●																				●				109.2
	Mb				●																					●			114.8
	C				●																								107.0
	C				●																●								70.2
	C				●																	●							65.7
B	Mb	●																											104.9
	Mb	●		●																									95.6
	Mb	●			●																								104.1
	Mb	●			●																								113.6
C	Mb	●				●																							105.6
	Mb	●					●																						111.5
	Mb	●						●																					115.9
	Mb	●							●																				130.0
	Mb	●								●																			135.2
	Mb	●									●																		140.8
D	Mb	●			●								●																149.2
	Mb	●			●									●															132.9
	Mb	●			●										●														168.6
	Mb	●			●											●													184.2
	Mb	●			●												●												194.4
	Mb	●			●													●											150.6
	Mb	●			●														●										207.3
	Mb	●			●															●									169.4
	Mb	●			●																●								151.5
	Mb	●			●																	●							140.9
E	Mb	●								●																			159.4
	Mb	●								●																			194.7
	Mb	●								●																			190.9
	Mb	●								●																			167.0
	Mb	●								●																			194.7
	Mb	●								●																			169.5
	Mb	●								●																			176.3
	Mb	●								●																			166.2
	Mb	●								●																			158.8
	Mb	●								●																			

□ は各種養生条件を組み合わせた場合の最大圧縮強度である。

<各種養生方法を組み合わせた条件>

A：打設→加圧養生（24時間）→脱型→材齢28日まで水中養生→圧縮強度試験

B：打設→脱型→水中養生（20℃で1日，3日，7日間）→材齢28日まで気中養生→圧縮強度試験

C：打設→脱型→温水養生（60℃，80℃で1日，3日，7日間）→材齢28日まで気中養生→圧縮強度試験

D：打設→脱型→水中養生（20℃で7日間）→加熱養生（100℃，150℃，200℃で1日，3日，7日間）→材齢28日まで気中養生→圧縮強度試験

E：打設→脱型→温水養生（80℃で3日間）→加熱養生（100℃，150℃，200℃で1日，3日，7日間）→材齢28日まで気中養生→圧縮強度試験

一タのバランスを考慮して行った。これによると、重相関係数 0.95 のもとで、重回帰係数は、温水養生=0.66，加熱養生=0.50，加圧養生=0.30であった。表-3の実験結果からは、加熱養生を行った場合の方が温水養生よりも高い強度が得られているが、回帰分析の結果からは温水養生，加熱養生，加圧養生の順に小さくなる結果となった。加熱養生の回帰分析値が温水養生よりも小さくなった要因としては、各種養生方法

を組み合わせた条件が影響を及ぼしていると考えられるが、本実験の結果からも、加熱養生と加圧養生を行う場合は、最適な条件下で養生を行わないと、十分な効果を発揮できず、逆に強度低下を引き起こす傾向が見られた。つまり、加熱養生については、実験結果からは最も高い強度を得られていても最適条件下で養生を行うことで初めてその効果を発揮できることから、回帰分析で強度上昇に与える影響度が温水養生

よりも低くなった要因ではないかと考えられる。従って、表－3の実験結果と回帰分析の結果より、超高強度化手法のひとつの養生条件としては、温水養生を基本に種々の養生方法を組み合わせる必要があるものと考えられる。

3.8 養生方法に関する総合評価

表－3で得られた結果をもとに温水養生，加熱養生，加圧養生の3種類の養生方法を組み合わせ，これをひとつの最適養生条件と仮定し，実際に試験練りを実施した。その結果を表－4に示す。これによると，温水養生 80℃，加熱養生 200℃，加圧養生 150MPa ～ 180MPa の組み合わせで，圧縮強度 250MPa ～ 300MPa 程度の超高強度コンクリートを製造することが可能であることが確認できた。

表－4 最適養生条件と圧縮強度との関係

調合 No	各種養生条件			圧縮強度 (MPa)
	温水養生 (℃)	加熱養生 (℃)	加圧養生 (MPa)	
2	80	200	152.9	293.2
2	80	200	153.1	280.9
2	80	200	153.8	255.4
2	80	200	180.4	299.0

＜養生方法＞：打設→加圧養生（加圧力 150MPa ～ 180MPa で載荷速度 4.9MPa/分）→脱型→温水養生（80℃で7日間）→加熱養生（200℃で1日間）→材齢 28日まで気中養生→圧縮強度試験

4. まとめ

本研究では，高強度化の最適条件について以下の知見を得た。

- 1) SF の分散性を高めるためには，水と SF 及び高性能 AE 減水剤を一緒に混練しスラリー状にした後，本練りを行うのが有効である。
- 2) 圧縮強度に影響を及ぼす要因としては，温水養生の影響が最も大きく，加圧養生の影響が最も小さかった。
- 3) 加熱養生の効果を高めるためには，水中養生を行う方が良い。また，加熱温度が 100℃の場合で7日間，150℃の場合では3日間，さらに 200℃の場合では1日間程度の養生を行うことが最適な養生方法である。

- 4) 温水養生 80℃，加熱養生 200℃，加圧養生 150MPa ～ 180MPa の組み合わせで，圧縮強度 250MPa ～ 300MPa 程度の超高強度コンクリートを製造することが可能である。

参考文献

- 1) 大濱嘉彦：手段を尽せばここまで高強度になる，セメント・コンクリート No.546, pp.64-69, 1992.8
- 2) 小柳治：コンクリートの高強度化とその限界，コンクリート工学，Vol.14, No.3, pp.3-8, 1976.3
- 3) 長瀧重義：高強度コンクリートの諸性質，コンクリート工学，Vol.14, No.3, pp.38-41, 1976.3
- 4) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 472 号，pp.11- 16, 1995.5
- 5) 長瀧重義，坂井悦郎：超高強度コンクリートの製造と用途，コンクリート工学，Vol.25, No.8, pp.15-23, 1987.8
- 6) 須藤儀一：オートクレープ養生の高強度発生機構，コンクリート工学，Vol.14, No.3, pp.20-24, 1976.3
- 7) 藤井健太郎：加圧成形による高強度コンクリートの製造，コンクリート工学，Vol.14, No.3, pp.54-57, 1976.3
- 8) 長井健雄ほか：蒸気養生したシリカフェーム混入超高強度コンクリートの性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.1, pp.81-86, 1993
- 9) 山口重英，大賀宏行ほか：シリカフェームを混和したコンクリートの流動性および強度に及ぼす練混ぜの影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.389-394, 1994
- 10) 六車熙：高強度コンクリート，セメント・コンクリート，No.546, pp.1-4, 1992.8
- 11) 米澤敏男ほか：高強度コンクリート中でのシリカフェームの分散状態の研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.1, pp.69-74, 1993
- 12) 大濱嘉彦，出村克宣ほか：3000kgf/cm² 以上の圧縮強度をもつモルタルの開発，セメント・コンクリート，No.534, pp.9-16, 1991.8