

論文 石英微粉末を添加した高強度コンクリートの諸特性

久保勝嗣*¹・伊藤幸広*²・石橋孝治*³・ノルマ フェブリエット*⁴

要旨：高強度コンクリートの混和材としては、シリカフュームが一般的に用いられるが、オートクレーブ養生を行う場合には、けい石粉末等のシリカ質微粉末が安価で有効な材料である。本研究では、シリカ質微粉末として石英砂を粉砕した石英微粉末、およびシリカフュームを混和材として用い、混和材の置換率および養生方法が高強度モルタルの流動性、強度および長さ変化率等の物性に及ぼす影響について検討したものである。結果として、水結合材比 18%のモルタルで加熱養生を行ったものは、オートクレーブ養生を行った場合の圧縮強度と同等かそれ以上となり、養生による収縮も同程度であった。

キーワード：石英微粉末、シリカフューム、高強度コンクリート、加熱養生

1. はじめに

ここ数年、RC高層建築物を始めとしてコンクリートパイルやポール等の二次製品に 60 から 100MPa 程度の高強度コンクリートを用いる事例が頻繁に見られるようになってきた。このようなコンクリートには、高強度化のための混和材として、マイクロファイラー効果とポゾラン反応の効果が得られるシリカフュームを用いるのが一般的である。一方、オートクレーブ養生を行うコンクリートにけい石粉末を混合すると、カルシウムシリケート水和物を生成し強度増進することが古くから知られている。けい石粉末等のシリカ質微粉末は、シリカフュームと比べ安価であり、二次製品の高強度化に有用な材料であるが、これを 100MPa を越えるような高強度コンクリートに用いた研究は比較的小さい^{1), 2)}。

本研究では、シリカ質微粉末として石英砂を粉砕した石英微粉末、およびシリカフュームを混和材として用い、これらの混和材とセメントとの置換率が高強度モルタルの流動性、強度お

よび長さ変化率等の物性に及ぼす影響について検討したものである。また、高強度モルタルの養生方法として、オートクレーブ養生と同等の効果が得られるとされている加熱養生^{1), 2)}の影響についても合わせて検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

実験で使用したセメントは、普通ポルトランドセメントである。石英微粉末は石英砂を微粉砕したものであり、SiO₂含有率は約 99%のものである。その比重は、2.63 である。シリカフュームはE社製のもので、比重 2.20 および SiO₂含有率 96%のものである。セメントおよび混和材の物理的性質は表-1 に示す通りである。細骨材は、熊本県玉名産の 5 号硅砂である。使用した混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤であり、比重 1.07、固形分率 30%のものである。練混ぜ水としては、上水道水を使用した。

* 1 佐賀大学大学院 工学研究科 (正会員)

* 2 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 (正会員)

* 3 佐賀大学教授 理工学部都市工学科

* 4 不二コンクリート工業 (株)

2. 2 配合

実験で検討した全ての配合において、細骨材の容積はモルタル全体の容積の 30%と一定とした。混和材の置換率および養生方法の違いによる影響を調べる実験（シリーズⅠ）では、表-2に示すように水結合材比を 18%および 28%とし、石英微粉末の置換率を 0 から 30%およびシリカフュームの置換率を 0 から 20%と変化させた 12 通りの配合について検討を行った。加熱養生において養生温度、時間の影響を調べる実験においては（シリーズⅡ），表-3に示すように水結合材比を 18%, 28%および 38%と 3 段階に変化させ、石英微粉末およびシリカフュームの置換率を 0 から 20%と変化させた。

水結合材比 18%の全ての配合においては練混ぜ水のみでは、練混ぜが不可能であるため混和剤を結合材質量の 4%混入した。なお、混和剤中の水分は練混ぜ水の一部として計算した。水結合材比 28%および 38%の配合では、混和剤を使用せず上水道水のみで練混ぜた。

2. 3 供試体の作製方法

モルタルの練混ぜにはホバートミキサを使用した。練混ぜ手順としては、ペーストを 15 分間で先練りした後、細骨材を投入し 5 分間練混ぜする方法とした。

締固め方法としては、テーブルバイブレーター上で振動を与えながら突棒で押し固めるようにして締固める方法とした。

2. 4 養生方法

モルタルは型枠（4×4×16cm）に打設後 24 時間、20℃、80%RH の恒温恒湿室内で気中養生した後、80℃の温水中で 24 時間養生を行った。シリーズⅠの実験においては、温水養生後の供試体について加熱養生もしくはオートクレープ養生を行った。加熱養生の養生方法は電気炉において各養生温度で一定時間加熱した。オートクレープ養生の養生方法は図-1に示す通りである。両者の養生方法の影響を比較するため、加熱養生およびオートクレープ養生とも

表-1 セメントおよびシリカ質混和材料の物理的性質

項目	特性
セメント	比重: 3.15, 比表面積: 3250cm ² /g 圧縮強さ(28日): 61.3N/mm ²
石英微粉末	比重: 2.63, 45μm残分: 7.7% SiO ₂ 含有率: 約99%
シリカフューム	比重: 2.20, 強熱減量(950℃): 0.7% SiO ₂ 含有率: 96%

表-2 シリーズⅠの配合

水結合材比 W/B (%)	結合材比:B (%)			細骨材容積 (Vol%)	混和剤 B× (%)
	C	QP	SF		
18	100	0	0	30	4
	90	10	0		4
	90	0	10		4
	80	20	0		4
	80	0	20		4
28	100	0	0	30	-
	90	10	0		-
	90	0	10		-
	80	20	0		-
	80	10	10		-
	80	0	20		-
	70	30	0		-

* C:セメント QP:石英微粉末 SF:シリカフューム

表-3 シリーズⅡの配合

水結合材比 W/B (%)	結合材比:B (%)			細骨材容積 (Vol%)	混和剤 B× (%)
	C	QP	SF		
18	90	10	0	30	4
	90	0	10		4
28	80	20	0	30	-
	80	0	20		-
38	80	20	0	30	-
	80	0	20		-

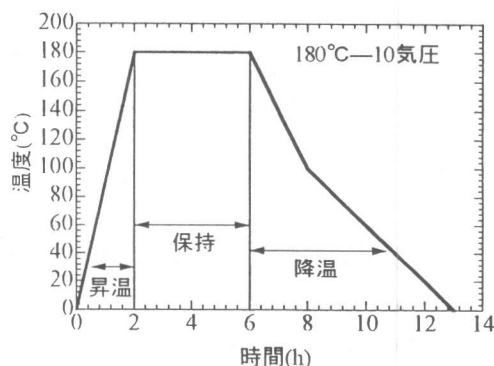


図-1 オートクレープによる養生方法

最高温度を 180℃および養生時間（オートクレープ養生の場合は最高温度保持時間）を 4 時間と一定とした。シリーズⅡの加熱養生の養生温度の影響を検討する実験では、養生温度を 150, 180, 200 および 240℃の 4 段階に変化させ、養生時間は 12 時間と一定とした。養生時間の影響を検討する実験では、養生時間を 4, 8, 12 および 24 時間の 4 段階に変化させ、養生温度は 180℃と一定とした。

2. 5 試験方法

モルタルのフロー試験および圧縮強度試験については、JIS R 5201 に準じて行った。曲げ試験は、スパン 9cm の中央集中載荷で行った。長さ変化率は、ダイヤルゲージ法によって測定した。圧縮強度試験および曲げ強度試験は、養生後、供試体を 24 時間放冷した後に行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 モルタルの流動性

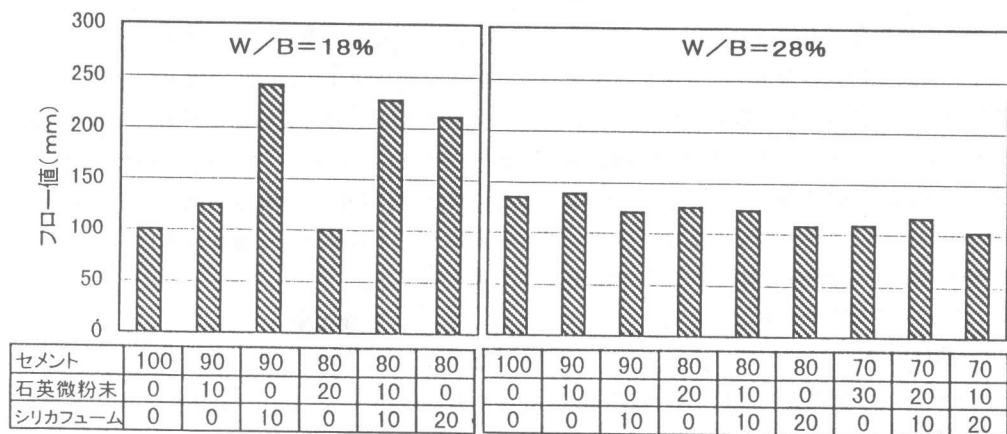
図-2 は、水結合材比 18% および 28% における各置換率でのフロー値を示したものである。水結合材比 18% において、石英微粉末をセメントの 10% 置換した配合では、若干流動性は見られるものの、石英微粉末をセメントの 20% 置換するとセメントのみの配合と同様にほとんど流動性が得られない結果となった。これに対しシ

リカフュームを置換した配合では 18% という極めて低い水結合材比でも、フロー値が 200mm 以上と高い流動性を示した。石英微粉末の添加により流動性が低下した原因としては、不定形という石英微粉末の粒子の形状が影響しているものと考えられる。一方、水結合材比 28% で混和剤を用いずに練混ぜたモルタルでは、シリカフュームを置換した配合においてもセメントのみの配合よりもフロー値は若干小さくなっている。低水結合材比の配合においては、シリカフュームは高性能減水剤等との併用により流動性を向上させる効果があることを示している。

3. 2 置換率および養生方法の影響

(1) 圧縮強度

図-3 は、水結合材比 18% および 28% における各置換率での圧縮強度を養生方法別に示したものである。水結合材比 28% においては、養生方法の違いによる影響がさほど見られないのに対し、水結合材比 18% では、いずれの配合においてもオートクレープ養生に対して加熱養生を行ったものは圧縮強度が同等かそれ以上となっている。加熱養生の効果としては、大濱ら¹⁾が指摘するように、極低水結合材比の緻密な組織を持つセメント硬化体では、内部の水分が加熱によって蒸発し水蒸気圧を発生させ水和反応や



* 結合材の質量比(%)

図-2 混和材置換率とフロー値の関係

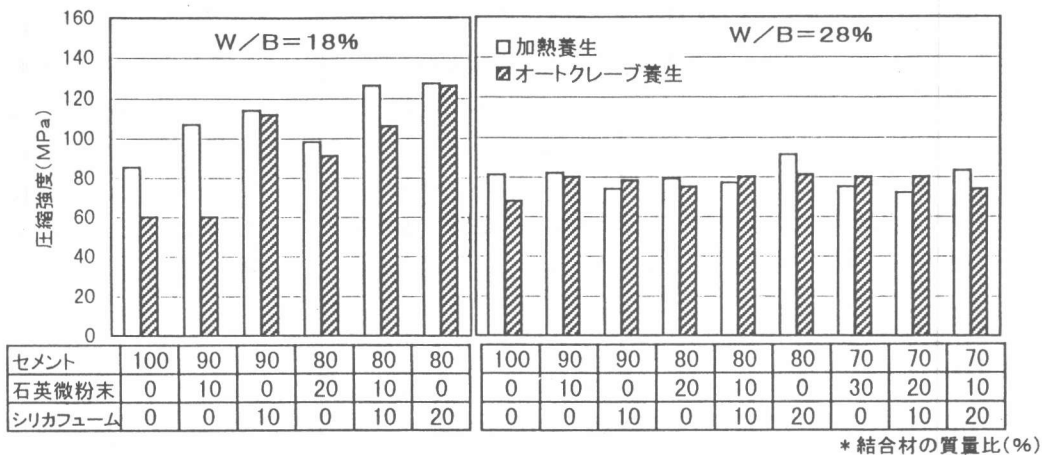


図-3 混和材置換率と圧縮強度の関係

ポズラン反応を促進させる効果があるとしているが、それに加え供試体の乾燥によって見掛け上圧縮強度が増加したものと考えられる。水結合材比 28%においても混和材の置換率にかかわらず、加熱養生はオートクレープ養生とほぼ同等の強度が得られることから、加熱養生は低水結合材比のモルタルの強度増進には簡易で効果的な養生方法であると思われる。

混和材の置換による効果は、水結合材比 28%ではほとんど見られない。これは、高性能 AE 減水剤を用いず練混ぜたことにより、混和材の分散が良好でなかったためと推察される。しかし、水結合材比 18%においては、混和材を置換することによって強度が増進している。同じ置換率では、石英微粉末の方がシリカフュームを用いたものよりも強度は低くなっているが、石英微粉末とシリカフュームをそれぞれ 10%ずつ置換した配合で加熱養生を行ったものは 126MPa の圧縮強度となっており、シリカフュームを 20%置換した配合でオートクレープを行ったものと同等の結果を示している。

(2) 曲げ強度

コンクリートは高強度となるほど、曲げ強度に対する圧縮強度の比、すなわち脆度係数が大きくなることが知られている。図-4は、各条件における脆度係数を示したものである。水

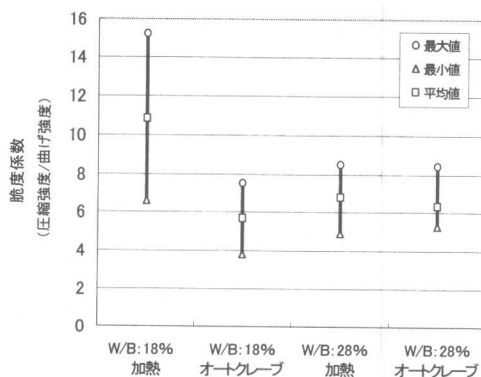


図-4 曲げ強度と圧縮強度の関係

結合材比 28%では、脆度係数は約 5 から 10 であり、養生方法の違いによる影響は小さい。しかし水結合材比 18%では、全般的にオートクレープ養生したものの方が脆度係数は小さく 3.8 から 7.5 となっている。加熱養生のモルタルの脆度係数は、6.6 から 15.2 と大きい、これは乾燥によって見掛け上圧縮強度が増加したためと考えられる。

(3) 長さ変化率

脱型直後の供試体長さを基長として、加熱養生もしくはオートクレープ養生終了後の長さ変化率を示したものが図-5である。全ての配合において加熱養生を行ったものは、加熱による脱水により収縮している。水結合材比 28%で加

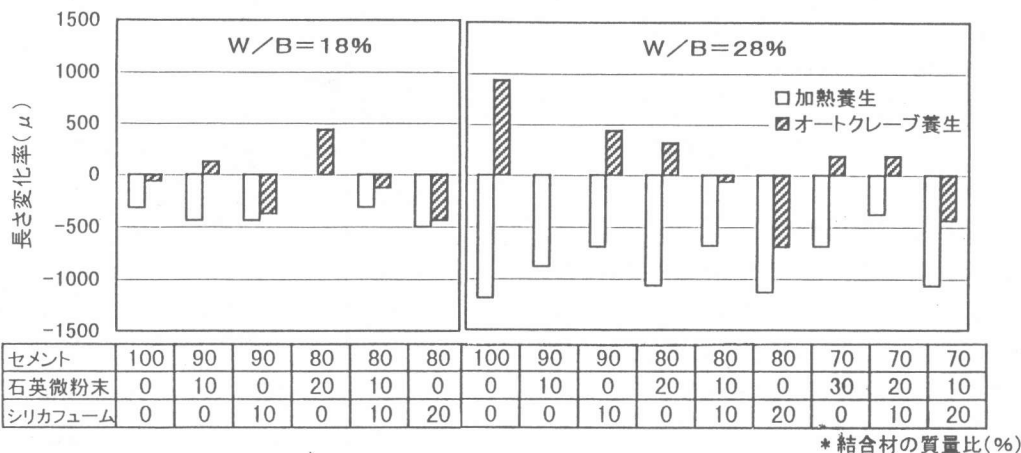


図-5 養生方法と長さ変化率の関係

熱養生を行ったモルタルの長さ変化率が -1000μ 前後であるのに対して、水結合材比 18% では、 -500μ 以下と同じ水結合材比でオートクレープ養生した場合と比較しても大きな違いはない。この理由としては、水結合材比 18% で蒸発し易い自由水が極めて少ないことと、組織が緻密であるため水分が逸散しにくいことが挙げられる。

3. 3 加熱養生における養生温度、時間の影響

(1) 圧縮強度

図-6 は、加熱養生における養生温度と圧縮強度の関係を示したものである。全般的に 150°C から 180°C に温度が上昇しても、各配合ともさほど大きな強度増加は見られないが、 200°C になると水熱反応が活発になったことにより強度の増進が見られる。さらに 240°C と高温となるとグラフはほぼ横ばいとなる。この中で最も緻密な組織を持つ、水結合材比 18%、シリカフューム置換率 10% のモルタルを 240°C で養生したものは、養生中に爆裂を起こした。逆に最も組織が粗いと思われる水結合材比 38%、石英微粉末置換率 10% のモルタルは、水和に必要な水分まで蒸発したために、シリカフュームを同比率置換したモルタルよりも大幅に強度が小さくなっている。

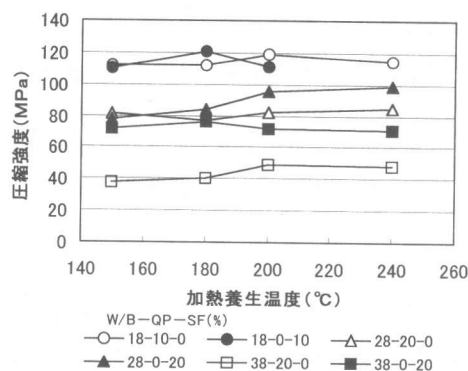


図-6 養生温度と圧縮強度の関係

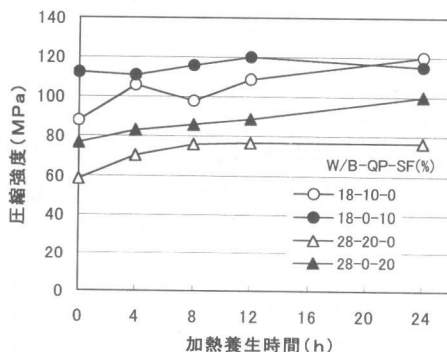


図-7 加熱時間と圧縮強度の関係

180°C で加熱養生した場合の養生時間と圧縮強度の関係を示したものが図-7である。いずれの配合においても養生時間が長くなるほど、

圧縮強度は増加する傾向を示している。養生時間 4 時間では、0 時間、即ち温水養生のみと比較して大幅な強度増進効果は得られていない。反応速度は緩慢であり、グラフより最高強度が得られるのは、養生時間が 24 時間かそれ以上と推察される。

(2) 長さ変化率

加熱養生温度と長さ変化率の関係を示したものが図-8 である。全ての配合において、180℃から 200℃にかけて大幅な収縮が見られるが、240℃となると逆に膨張に転じている。これは高温に伴う微細なクラックの発生によるものと考えられる。

図-9 は、加熱養生時間と長さ変化率の関係を示したものである。水結合材比 18%、石英微粉末の置換率 10%の配合を除く各配合において、養生時間 8 時間までは収縮の傾向を示すが、それ以降はほとんど変化が見られない。即ち養生時間 8 時間までに蒸発しやすい自由水の脱水に伴う収縮が終了するものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

(1) シリカフュームをセメントと置換した配合では 18%という極めて低い水結合材比でも、フロー値が 200mm 以上と高い流動性を示した。これに対し石英微粉末を置換した配合ではセメントのみの配合と同様にほとんど流動性が得られなかった。

(2) 水結合材比 28%においては、養生方法の違いが圧縮強度に及ぼす影響はほとんど見られないのに対し、水結合材比 18%では、オートクレーブ養生に対して加熱養生を行ったものは圧縮強度が同等かそれ以上となった。石英微粉末とシリカフュームをそれぞれセメントの 10%づつ置換した配合で加熱養生を行ったものは、シリカフュームを 20%置換した配合でオートクレーブを行ったものと同等の結果となった。

(3) 加熱養生を行ったモルタルは、配合に係わらず加熱による脱水により収縮した。しかし、

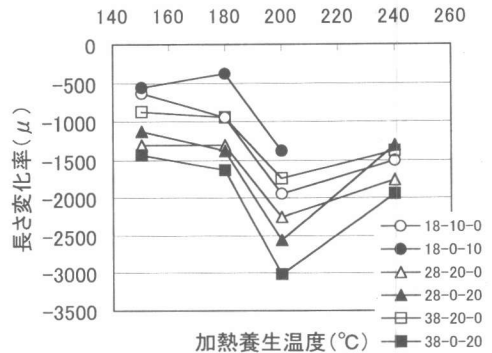


図-8 養生温度と長さ変化率の関係

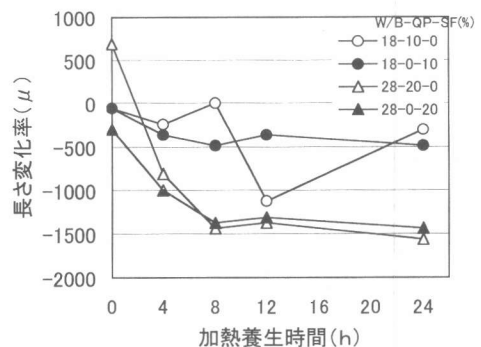


図-9 養生時間と長さ変化率の関係

水結合材比 18%のモルタルは、長さ変化率が-500μ以下と同じ水結合材比でオートクレーブ養生した場合と比較しても大きな違いはなかった。

(4) 加熱養生における養生温度と圧縮強度の関係を調べた結果、150℃から 180℃に上昇しても、各配合ともさほど大きな強度増加は見られないが、200℃になると水熱反応が活発になったことにより強度の増進が見られた。

参考文献

- 1)大濱嘉彦, 出村克宣, 林志翔: 超高強度モルタルの強度性状に及ぼす調査要因及び養生条件の影響, 第 44 回セメント技術大会講演集, pp674-679, 1990.
- 2)Pierre Richard and Marcel Cheyrezy: Composition of Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1501-1511, 1995