

論文

[1075] 結合材の配合比が超高強度コンクリートの品質に及ぼす影響

正会員○磯屋孝代（日本国土開発技術研究所）

正会員 佐原晴也（日本国土開発技術研究所）

星野昭平（日本国土開発技術研究所）

正会員 竹下治之（日本国土開発技術研究所）

1. はじめに

近年、圧縮強度800～1000kgf/cm²クラスの超高強度コンクリートの研究が盛んに行われている。超高強度コンクリートの多くは、単位結合材量が非常に多く、しかも水結合材比が極めて小さくなるため、水和熱に基づく高温履歴による長期強度の低下と、ワーカビリティに問題が生じることが多い。

本研究では、発熱量を抑えるため単位結合材量を550kg/m³とし、セメントの一部を分級フライアッシュあるいは高炉スラグ微粉末で置換することによって、圧縮強度が低下することなく、ワーカビリティが改善される超高強度コンクリートの配合を検討した。

2. 使用材料および練り混ぜ方法

2.1 使用材料

実験で使用した材料を表-1に示す。

表-1 使用材料

セメント	C	普通ポルトランドセメント（比重 3.16，ブレン値 3180 cm ² /g）
シリカフューム	SF	顆粒状（比重 2.23，比表面積 15～20 m ² /g）
フライアッシュ	FA	分級フライアッシュ（比重 2.35，比表面積 6230 cm ² /g）
高炉スラグ	SG	高炉スラグ微粉末（比重 2.91，比表面積 6000～6500cm ² /g）
細骨材	S	浅間山山砂30%，相模川水系70%（比重 2.60，F.M. 2.74）
粗骨材	G	青梅産砕石（比重 2.65，F.M. 6.81）
高性能AE減水剤	Ad	芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物

2.2 練り混ぜ方法

練り混ぜは、既往の実験結果 [1] に基づき、図-1 に示す手順で行った。

ミキサは、100ℓパン型強制練りミキサを使用し、ブレード回転数は65rpmとした。

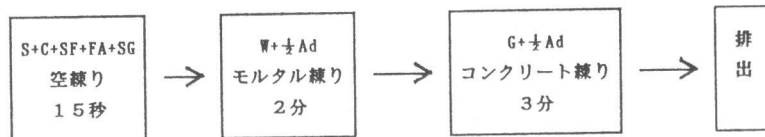


図-1 練り混ぜ方法

3. 実験概要

3.1 試験項目

フレッシュコンクリートの試験として、スランプ、スランプフロー、VF試験および5mmふるいでスクリーニングしたモルタルの粘度を、硬化コンクリートの試験として、圧縮強度（材令7日、28日）と実体顕微鏡による表面観察を行った。

さらに、本実験で検討を行った各配合から粗骨材を除いたモルタルを、スタイロフォームで作成した厚さ10cmの断熱容器に密閉し、発熱温度を測定した。

3.2 コンクリートの配合

本実験で検討したコンクリート配合を表-2に示す。高性能AE減水剤（以下、減水剤と称す）の添加量は、単位結合材量B（C+SF+FA+SG）に対する割合で示した。

各配合は、単位結合材量を550kg/m³とし、スランブが25cm程度となるように減水剤の添加量を加減して調整した。

表-2 コンクリートの配合

配合No	最大寸法(mm)	W/B*(%)	s/a(%)	単位量 (kg/m ³)						Ad(%)	
				W	C	SF(%**)	FA(%**)	SG(%**)	S		G
①	20	26	42	143	495	55(10)	0(0)	0(0)	676	1034	3.75
②					495	27.5(5)	27.5(5)	0(0)	677	1035	3.75
③					467.5	27.5(5)	55(10)	0(0)	674	1031	3.0
④					440	27.5(5)	82.5(15)	0(0)	671	1026	3.0
⑤					412.5	27.5(5)	110(20)	0(0)	668	1021	2.5
⑥					495	27.5(5)	0(0)	27.5(5)	680	1039	3.75
⑦					467.5	27.5(5)	0(0)	55(10)	679	1038	3.0
⑧					440	27.5(5)	0(0)	82.5(15)	678	1037	3.0
⑨					412.5	27.5(5)	0(0)	110(20)	677	1016	2.5

* Bは、単位結合材量(C+SF+FA+SG)を示す。

** ()内は、単位結合材量(550kg/m³)に対する割合。

4. 試験結果と考察

4.1 フレッシュコンクリートの性状

表-2に示すように、セメントの一部を分級フライアッシュ(以下、フライアッシュと称す)または高炉スラグ微粉末(以下、スラグと称す)で置換した場合、置換率が10%以上になるとシリカフェームのみの場合と比べて減水剤の添加量は減少した。

コンシステンシー試験の結果を図-2に示す。フライアッシュ、スラグの場合とも置換率が大きくなるにつれてスランブフローは増大したが、20%になると逆に減少し、コンクリートの取扱いも悪くなった。また、スラグの場合に比べてフライアッシュで置換した方が、スランブフローがやや大きくなり、コンクリートの取扱いも良くなった。

超高強度コンクリートの流動性は、通常のコンクリートとは異なる性状を示すことから、コンクリートの静的性状はスランブ試験だけで判断する事が難しい[2]。そこで、5mmふるいでスクリーニングしたモルタルの粘度を回転粘度計で測定し、レオロジーによる評価を行った。図-3, 4にフライアッシュ、スラグで置換したモルタルの、ずり速度とずり応力の関係をそれぞれ示す。

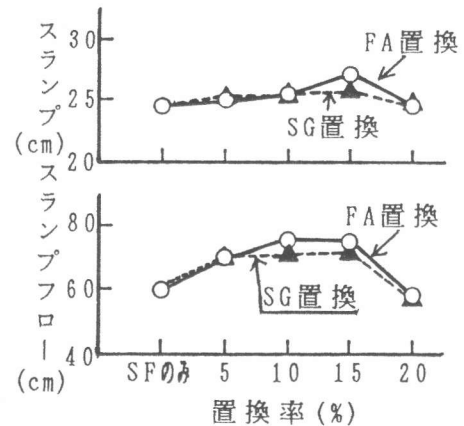


図-2 コンシステンシー試験結果

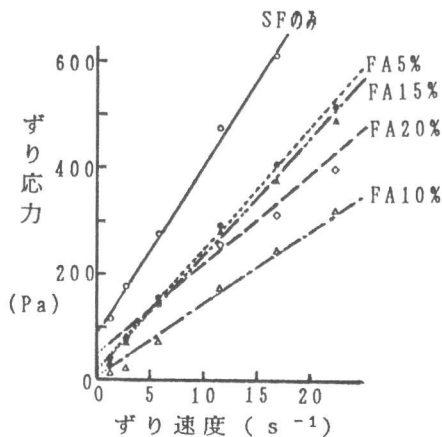


図-3 フライアッシュで置換した場合のずり速度とずり応力の関係

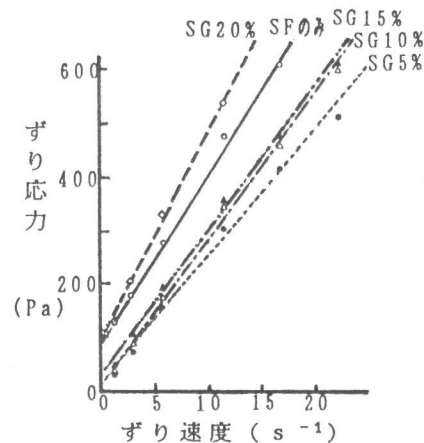


図-4 スラグで置換した場合のずり速度とずり応力の関係

同図から、フライアッシュで置換した場合、降伏値（直線とずり応力軸の切片の値）はシリカフュームのみの場合に最も大きくなり、置換率が大きくなると減少したが、15%を越えると少しずつ増加する傾向が見られた。塑性粘度（直線の傾き）は、シリカフュームのみの場合と比べて低下したが、置換率との関係は明らかではなかった。スラグで置換した場合、降伏値はフライアッシュと同様の傾向が見られたが、20%置換した場合にはシリカフュームのみの場合より大きくなった。塑性粘度については、置換率の影響は小さく、シリカフュームのみの場合と比べても大きな違いは見られなかった。また、同じ置換率であっても、スラグで置換した場合に比べてフライアッシュで置換した場合の方が粘性が低く、コンクリートの取扱いも良かった。

V F 試験では、振動時間（コンクリートが外側の枠に達するまでに要する時間）とその時のコンクリートの下がり量を測定した。これらの結果を図-5に示す。同図から、フライアッシュ、スラグともに置換率が5~15%の範囲では、シリカフュームのみの場合に比べて振動時間が約10秒短くなり、その時のコンクリートの下がり量が小さくなる傾向が見られたが、20%になると振動時間は長くなり、コンクリートの下がり量も大きくなった。このように振動時間が短く、コンクリートの下がり量が小さくなる現象は、モルタルの粘度が低下し流動性が良くなったためにモルタルの流出が多くなり、粗骨材はシリンダーから流出せず分離したものであり、実際V F 試験においても、中央部に粗骨材が多く残り、分離

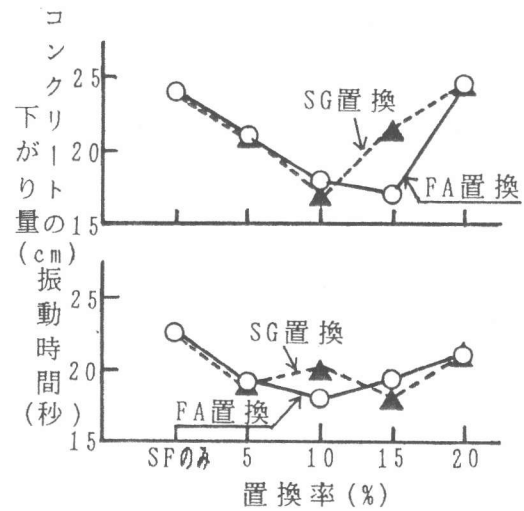


図-5 V F 試験結果

気味であった。超高強度コンクリートは、モルタル自身の強度が高いため、材料分離を生じても圧縮強度に顕著に影響はしないが[3]、均一なコンクリートが得られないことは問題となる。そこでV F 試験結果から、骨材分離を生じないための推奨値を求めることを試みた。図-6にコンクリートの下がり量と変形度（スランブフロー/スランブ比 SLF/SL）の関係を示す。

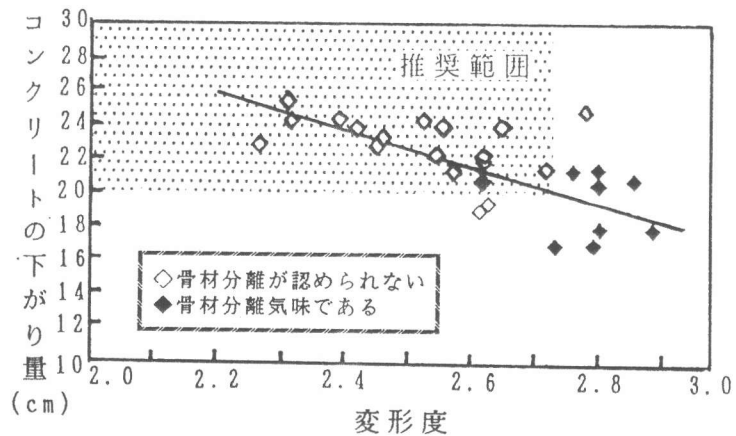


図-6 コンクリート下がり量と変形度の関係

本実験結果では、コンクリートの下がり量が約20cm以上であれば骨材分離が生じにくいことが認められたが、その時のコンクリートの変形度は、同図から約2.7であった。また、変形度が2.75以上になると、ほとんどの場合に骨材分離気味となった。このことから、減水剤の添加量を調節し、変形度を2.7程度以下に抑えることによって、粗骨材の分離は防止できることが分かる。

4.2 硬化コンクリートの性状

圧縮強度の試験結果を図-7, 8に示す。フライアッシュで置換した場合、7日および28日強度は置換率が大きくなるにしたがって低下し、28日強度で最大約135kgf/cm²低下したが、91日強度ではシリカフェームのみの場合との強度差は小さくなった。一方、スラグで置換した場合、置換率に関わらずシリカフェームのみの場合とほぼ同等の圧縮強度が得られたが、フライアッシュの場合とは異なり、材令28日から91日までの強度の伸びは幾分小さくなった。これは、スラグが比較的反応性が高く、水和後短時間でC-S-Hが析出するのに対し、フライアッシュの反応性が低く、長時間継続して高強度化したものと考えられる[4]。

コンクリートの表面を研磨し、実体顕微鏡による観察を行った。材令28日における代表的な写真を写真1~3に示す。シリカフェームのみのコンクリートの場合、粗骨材とモルタルは十分に付着しているが、フライアッシュあるいはスラグで置換した場合、粗骨材の界面には白色結晶が析出している。この白色結晶は水酸化カルシウムと考えられるが、反応性が極めて高い

シリカフェームを多く使用した場合、ポゾラン反応によりこれが早期に消費されるが、セメントの一部をフライアッシュあるいはスラグで置換した場合には、シリカフェームに比べて消費速度が遅くなったものと考えられる。白色結晶の析出量と圧縮強度との関係は明らかではないが、一般的に析出量が多く観察されたものほど強度が低下する傾向が見られた。析出した白色結晶は材令とともに消費され、材令3ヶ月程度ではほぼ確認できないほどに減少した。

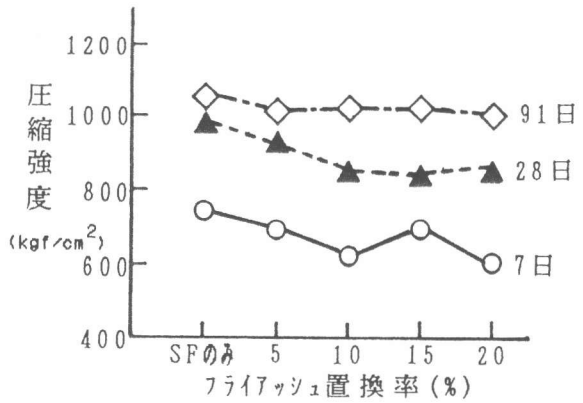


図-7 フライアッシュで置換した場合の圧縮強度

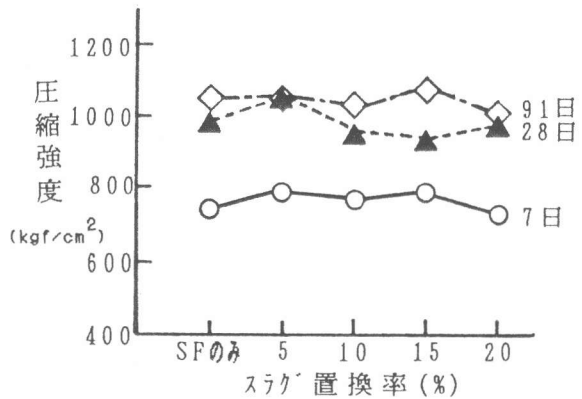


図-8 スラグで置換した場合の圧縮強度

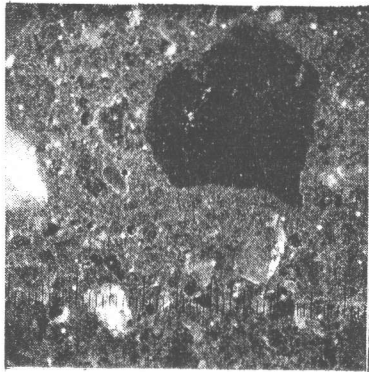


写真-1
配合① (SF=10%)

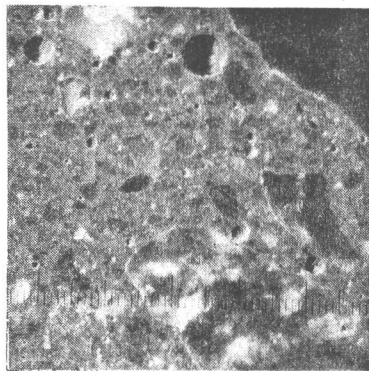


写真-2
配合⑤ (SF=5%)
(FA=20%)

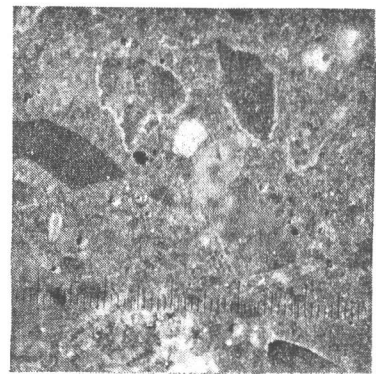


写真-3
配合⑨ (SF=5%)
(SG=20%)

1 mm

4.3 発熱温度測定

本試験で用いた配合の温度抑制効果を比較検討するため、各配合から粗骨材を除いてモルタルを作成し、これを断熱容器に密閉して発熱温度を測定した。

まず、単位結合材量の相違による発熱温度を比較するため、表-3に示すように単位結合材量が500、550、600 kg/m³の3種類の配合について試験を行った。発熱温度の測定結果を図-9に示す。同図から、単位結合材量が50 kg/ m³変化するごとに約5℃ずつ変化しており、本実験においても結合材量10 kg/ m³あたり約1℃の温度抑制効果があることを確認した。

また、単位結合材量を550 kg/ m³とした場合、セメントの一部をフライアッシュあるいはスラグで置換した場合の最高温度を図-10に、それまでに要した時間を図-11に示す。

フライアッシュで置換した場合、置換率が増加すると最高温度は低くなる傾向が見られ、5% (27.5 kg/ m³) 置換するごとに最高温度が約3.5℃低下した。これは、セメント量の減少とフライアッシュで置換したことによる相乗効果と考えられる。また、最高温度に達する時間は置換率が大きくなるにつれて遅くなり、5%置換するごとに約130分遅延し、温度上昇速度は緩慢となった。

スラグで置換した場合、最高温度は置換率が10%程度まではほとんど変わらなかったが、その後は置換率が5%増加するにつれて約2℃低下した。このように、スラグで置換した場合は、フライアッシュの場合と比べて温度抑制効果が小さくなったが、これはスラグが温度依存性があるため、セメントの5~10%を置換しただけではセメントの水和発熱温度の影響が大きく、反応が活性化されたものと考えられる。また、最高温度に達する時間は、置換率が増加すると遅くなっ

表-3 コンクリートの配合 (単位結合材量の変化)

配合No	最大寸法 (mm)	W/B* (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					Ad (%)
				W	C	SF	S	G	
①	20	26	42	130	450	50	742	1045	4.5
②			40	143	495	55	676	1034	4.0
③			38	156	540	60	614	1020	3.5

* Bは、単位結合材量 (C+S F) を示す。

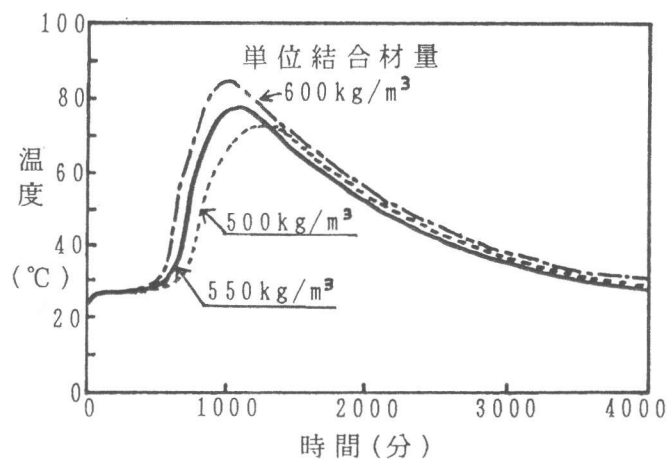


図-9 単位結合材量による発熱温度

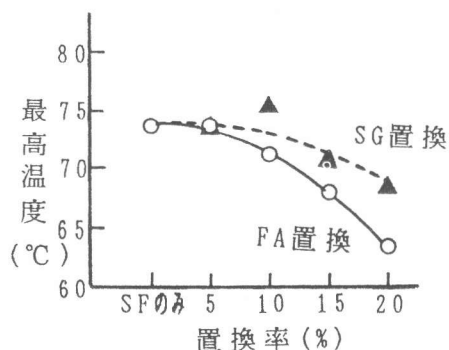


図-10 モルタルの最高温度

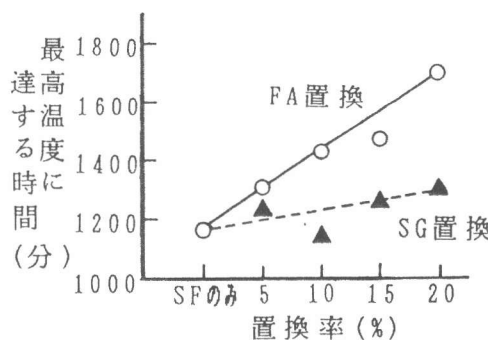


図-11 最高温度に達する時間

たが、フライアッシュの場合と比べると遅延の程度は小さく、5%置換するごとに約35分遅くなった。これは、スラグで置換した方が、反応速度が速いためと考えられる。

5. まとめ

結合材の配合比が超高強度コンクリートの品質に及ぼす影響を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) セメントの一部をフライアッシュあるいはスラグで置換した場合、シリカフェームのみのコンクリートと比べてワーカビリティが改善される。
- (2) 結合材の種類や置換率によって、フレッシュコンクリートの性状は異なる。フライアッシュで置換した場合はスラグの場合に比べてモルタル粘度が低くなり、取扱いも良くなる。また、置換率が大きくなるとコンクリートの粘性は低下する傾向にあるが、逆に20%になると粘性は増加し、特にスラグで置換した場合、シリカフェームのみの場合より粘性は増加する。
- (3) VF試験によって、振動下でのコンクリートの流動特性および骨材の分離が判断できるが、変形度を2.7程度にすれば骨材分離を防止できる。ワーカビリティを改善するためには、フライアッシュおよびスラグともに、その置換率は5~15%が良いと考えられる。
- (4) セメントの一部をスラグで置換した場合、圧縮強度は置換率5~20%の範囲ではシリカフェームのみの場合とほぼ同等となったが、材令28日から91日の強度の伸びは幾分小さくなる。一方、フライアッシュで置換した場合、7日および28日強度では置換率の増加とともに強度低下が見られたが、91日強度ではシリカフェームのみの場合とほぼ同等となる。圧縮強度の点からは、スラグで置換する場合はその置換率は5~20%、フライアッシュで置換する場合は、28日強度を基準にすることを考えれば5%程度が適当な範囲と考えられる。
- (5) 単位結合材量の内割り10%をシリカフェームで置換した場合、単位結合材量 $10\text{kg}/\text{m}^3$ により最高温度は約 1°C 変化する。
- (6) セメントの一部をフライアッシュで置換する場合、置換率が5% ($27.5\text{kg}/\text{m}^3$) 増加するにつれて最高温度は約 3.5°C 低下する。一方、スラグで置換する場合、置換率が10%までは温度抑制効果が小さいが、その後は置換率が5%増加するにつれて最高温度は約 2°C 低下する。
- (7) 以上の結果、フレッシュコンクリート、圧縮強度および発熱温度の点から推奨すべき配合は、フライアッシュで置換する場合は置換率5~10%、スラグで置換する場合は置換率5~15%程度が適当であると考えられる。

参考文献

- 1) 磯屋孝代ほか：高強度コンクリートの特性に及ぼす練り混ぜ因子の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11、No. 1、pp. 219-224、1991. 6
- 2) 谷川恭雄：フレッシュコンクリートのレオロジー入門、リアライズ社、pp. 1~29、1991. 7
- 3) 谷川恭雄ほか：高強度コンクリートの材料分離性状に関する実験的研究、第45回セメント技術大会講演集、pp. 212-217、1991. 4
- 4) 友澤史紀ほか：新コンクリート用混和材料、pp. 180~195、シーエムシー、1988. 6