

論文 高強度混和材と各種無機粉体を使用した高流動コンクリートの性状

山本賢司*1・盛岡実*2・渡邊芳春*3・坂井悦郎*4

要旨: 同一粉体量の高流動コンクリートに高強度混和材を用いた場合、無機粉体の種類によらず、単位セメント量を低減しても高強度混和材を用いないものと同等以上の圧縮強度が得られた。高炉水砕スラグと高強度混和材を併用すると、早期に高い強度が得られるとともに、水和熱による温度上昇を大幅に抑制でき、温度ひび割れが低減される可能性のあることが判った。また、圧縮強度と自己収縮がほぼ直線関係にあることも判った。

キーワード: 高強度混和材, 無機粉体, 高流動コンクリート, 強度, 水和熱, 自己収縮

1. はじめに

高流動コンクリートは施工の良否の影響を受けにくい、耐久な鉄筋コンクリート構造物を構築する上で今後も重要な役割を果たすと思われる。これまでに高流動コンクリートについて様々な配合が検討されてきた¹⁾。粉体系や併用系の高流動コンクリートでは、材料分離抵抗性を付与することを目的に単位粉体量を一定量確保するため、多量の高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末を利用している。しかしながら、高炉スラグ微粉末を利用すると高強度が得られるものの、水和熱に伴う断熱温度上昇量が高い値を示すことや、自己収縮が大きくなる等の問題点が指摘されている。石灰石微粉末ではこのような問題を生ずることがなく、高流動コンクリートに多く用いられている。これは、アルミネート相との反応は生じる²⁾ものの、強度発現性の観点からは不活性と考えられるためである。これに関連して、筆者らは徐冷スラグを微粉末化したものが不活性な無機粉体として利用できる可能性を見出している。

一方、筆者らは高強度混和材を使用することにより、同一強度を得るための単位セメント量

を低減できるため、水和熱を小さくでき、環境負荷の低減に効果があることも報告している^{3)~5)}。高流動コンクリートにおいても、単位セメント量を低減し、要求される強度を確保できることは、水和熱を低減するうえで重要なことである。以上より、本研究では、各種無機粉体を用いた高流動コンクリートへの高強度混和材の適用性について検討を加えた。なお、高流動コンクリートへの徐冷スラグ微粉末の適用性を明らかにすることは、路盤材等に適用され、従来の用途を失いつつある徐冷スラグの有効利用の観点からも重要である。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に本研究で使用した材料の性質を示す。エトリンサイト生成系高強度混和材(以下、Add.と表記)は無水石膏及びシリカ質微粉末を主成分とし⁵⁾、エトリンサイトの生成を利用して高強度を発現させる。これはエトリンサイトの空隙充填能力が大きいことと、それ自身の結晶強度が高いことにより硬化体の密実化と微細構造の強化を促すためとされている³⁾。表-2 に使

*1 電気化学工業(株)青海工場 セメント・特混研究所 工修 (正会員)

*2 電気化学工業(株)青海工場 セメント・特混研究所 工博 (正会員)

*3 電気化学工業(株)青海工場 セメント・特混研究所副主任研究員 (正会員)

*4 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科材料工学専攻 工博 (正会員)

表-1 使用材料の性質

使用材料	性 質
セメント	普通セメント, 密度 3.16g/cm ³
細骨材	川砂, 密度 2.62g/cm ³ , FM : 2.71
粗骨材	川砂利, 密度 2.64g/cm ³ FM : 6.73, G _{max} : 25mm
混和剤 (Admix.)	ポリカルボン酸系 高性能 AE 減水剤
高強度混和材 (Add.)	密度 2.40g/cm ³ ブレン比表面積 6100cm ² /g

用した無機粉体の化学組成及び物理的性質を示す。徐冷スラグ, 石灰石微粉末, 高炉水砕スラグ (以下, それぞれバラス, LS, BFS と表記) の3種類の無機粉体を粉末度が同程度になるように粉碎して用いた。バラスの化学組成は BFS とほぼ同様であり, 粉末 X 線回折法による同定結果からゲーレンイトを主成分としていることが確認された。

2.2 コンクリート配合と練混ぜ方法

表-3 にコンクリート配合を示す。単位水量及び単位粉体量をそれぞれ 165kg/m³, 550kg/m³ で一定とした。配合①~③では普通セメントを 350kg/m³, 無機粉体を 200 kg/m³ 使用し, その種類を変えた。配合④~⑥では配合①~③からそれぞれ単位セメント量を減じて Add. を使用した。これらのコンクリートは無機粉体や Add. の密度が異なるため, 骨材の単位量が若干異なるが, 基本的に同一配合のコンクリートとみなすことができる。練混ぜ直後のスランプフローが同程度になるようにポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の添加率を調整した。バラスを使用した配合①では, LS, BFS を用いた配合②, ③よりも多くの混和剤を必要とした。また, Add. を用いた配合④~⑥では, Add. の粉末度がセメントより高いため, Add. を用いない配合①~③と比較して多くの混和剤を要した。

表-2 無機粉体の性質

粉 体	化 学 組 成										密度 (g/cm ³)	ブレン (cm ² /g)
	ig-loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O		
バラス	0.4	1.7	31.7	14.8	1.5	39.5	7.2	1.6	0.2	0.2	3.00	4500
LS	43.5	0.4	0.1	0.1	0.1	55.3	0.3	-	-	-	2.71	4550
BFS	-	0.6	33.1	14.8	1.0	40.6	6.7	1.9	0.2	0.2	2.90	4500

表-3 コンクリート配合

配合	記 号	単 位 量 (kg/m ³)							Admix. (B %)
		W	C	P	Add.	S	G		
①	バラス	165	350	バラス 200	-	770	840	1.4	
②	LS	165	350	LS 200	-	761	831	1.3	
③	BFS	165	350	BFS 200	-	767	837	1.3	
④	バラス+Add.	165	300	バラス 200	50	763	833	1.7	
⑤	LS+Add.	165	300	LS 200	50	755	824	1.6	
⑥	BFS+Add.	165	300	BFS 200	50	761	831	1.5	

スランプフロー 650 ± 50mm, Air 4.5 ± 1.5%, s/a 48%

練混ぜ方法としては、粉体と骨材を投入して20秒間空練りを行った後、混練水と混和剤を投入し、3分間練混ぜた。容量50Lの二軸強制練りミキサーを用い、40L分のコンクリートを練混ぜた。

2.3 試験項目及び試験方法

(1) フレッシュ性状

土木学会高流動コンクリートの設計・施工指針に準拠し、スランプフロー、500mmフロー到達時間、及びV漏斗流下時間を測定した。

(2) 圧縮強度試験

JIS A 1108に準拠し、材齢7, 28, 56日の圧縮強度を測定した。

(3) 断熱温度上昇試験

φ150×200mmの鋼製容器にコンクリートを密閉し、空気循環式の断熱温度上昇測定装置を用いて行った。なお、練上がり温度を20℃とし、測定を5日まで行った。

(4) 自己収縮ひずみ

JCI自己収縮研究委員会報告書セメントペースト、モルタル及びコンクリートの自己収縮及び自己膨張試験方法(案)に準拠し、材齢56日まで測定を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状

図-1にスランプフローの経時変化を、表-4に練上がり後の500mmフロー到達時間とV漏斗流下時間を示す。練上がり後のフローを同程度にした場合、バラスを使用した配合①では、LS、BFSを用いた配合②、③よりも多くの混和剤を添加したので、経時に伴うフローダウンが小さく、良好な保持性を示した。

バラスとAdd.を用いた配合④では練上がり30分後にわずかにフローアップが見られたが、その後緩やかにフローが低下した。一方、配合⑤、⑥では、配合④と比較してフローダウンが大きかった。このように練上がり後のフローを合わせた場合、バラスを用いるとLSやBFSと

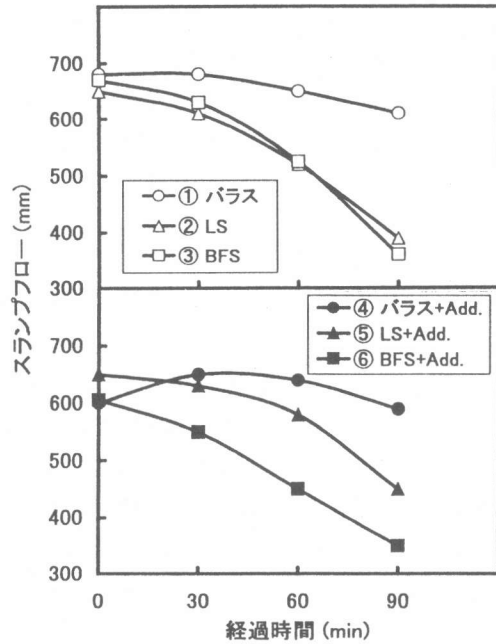


図-1 スランプフローの経時変化

表-4 フロー到達時間と流下時間

配合	500mmフロー	
	到達時間(s)	V漏斗流下時間(s)
①バラス	4.4	23.6
②LS	3.9	16.1
③BFS	4.3	18.4
④バラス+Add.	5.1	25.0
⑤LS+Add.	4.4	17.8
⑥BFS+Add.	5.0	20.3

比較して混和剤の使用量が多くなるので、Add.を併用した場合でも流動性の保持が良好であることが判った。

また、Add.の有無によらず、バラスを配合したコンクリートでは、LSあるいはBFSを配合したものと比較してV漏斗流下時間が長く、粘性が強かった。そのため材料分離に対する抵抗性は大きいと思われるが、鉄筋の配置が密になるとコンクリートの充填が充分に行われな

とも考えられる。充填性に関しては今後の検討課題である。本研究では無機粉体のブレイン比表面積をほぼ同一に調整して評価しているため、無機粉体の種類によってこれを使用したコンクリートの減水剤添加量が異なることや粘性に違いが生じたのは、使用した無機粉体粒子の特性によるものと考えられ、さらに詳細な検討が必要である。

3.2 圧縮強度

図-2に圧縮強度の測定結果を示す。バラスまたはLSを配合したものは材齢28日で60 N/mm²程度、材齢56日で65 N/mm²程度の強度を示した。BFSを配合したものは材齢7日で50 N/mm²を超え、その後の強度増進も大きく、材齢56日では90 N/mm²を超えている。Add.をバラスあるいはLSと併用した場合、単位セメント量が小さいために材齢7日の強度が低くなっているが、材齢7日から材齢28日にかけての強度の増進が大きく、材齢28日では逆にAdd.を用いないものよりも高い値を示し、Add.を用いない場合の材齢56日の圧縮強度とほぼ同等の強度を示した。Add.とBFSを併用するとAdd.を用いないものと比較して、バラスあるいはLSの場合とは逆に材齢7日では高い強度を示したが、7日から28日にかけての強度増進が小さくなり、材齢28日以降ではほぼ同等の強度を示した。

以上より、同一粉体量でAdd.を用いた場合、無機粉体の種類によらず、単位セメント量を50kg/m³程度低減してもAdd.を用いないものと同様以上の圧縮強度を示すことが明らかとなった。

3.3 断熱温度上昇

図-3に断熱温度上昇測定の結果を示す。一般に断熱温度上昇曲線は下に示す式(1)で近似される。

$$\Delta T = K \{1 - \exp(-\alpha t^\beta)\} \quad (1)$$

ここで

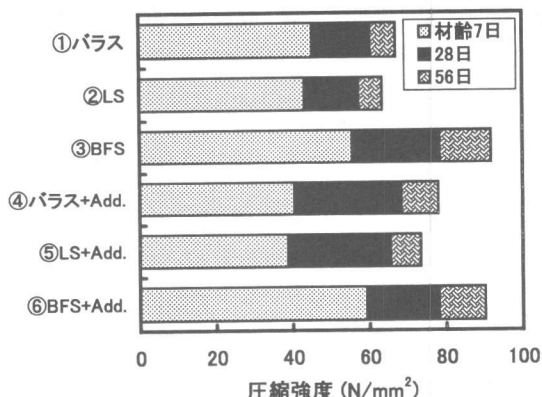


図-2 圧縮強度測定結果

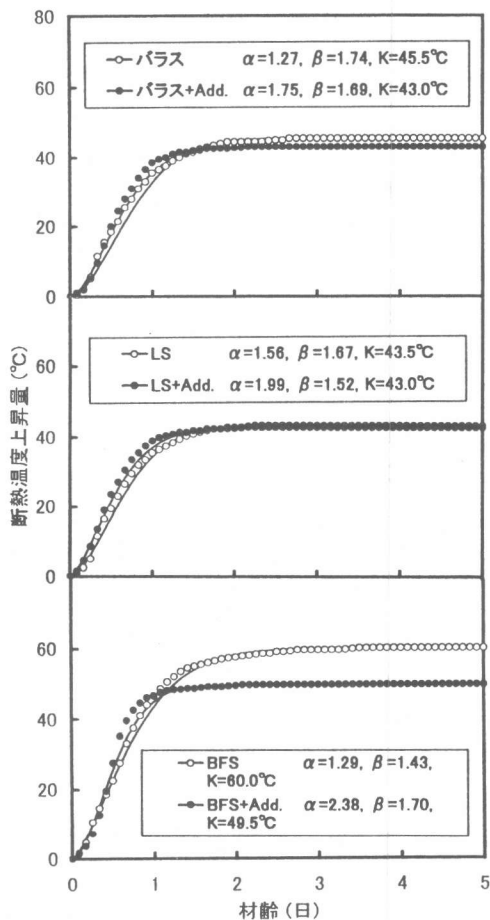


図-3 断熱温度上昇試験結果

ΔT : 断熱温度上昇量(°C) t : 材齢

K : 最高温度上昇量(°C) α, β : 実験定数
 本研究においても測定結果から α, β 及び K を求め、図-3中に回帰曲線とともに示した。 K 値について見ると、Add. を使用することにより、LSではほぼ同等であるが、バラスでは1.5°C、BFSでは10.5°C低い値を示している。特にBFSにおいて、 K 値の低下量は単位セメント量の低減だけでは説明できない。BFSとAdd. を併用した場合には Add. を用いない場合と比較して断熱温度上昇における α 値が大きく、材齢7日における圧縮強度が大きいことから、初期における BFS の水和反応が促進されていると考えられる。このため初期に BFS の粒子表面が緻密な水和物で覆われ、その後の水和が抑制されて、単位セメント量の低減以上に K 値が低い値を示したものとと思われる。

図-4に各コンクリートの材齢28日における圧縮強度と K 値の関係を示す。強度が高くなるほど K 値が大きくなる傾向が認められるが、Add. を使用することで K 値を上げることなく、高強度が得られることが明らかになった。特に、BFSとAdd. を併用したものは材齢28日で約80N/mm²の高い強度がでていながら K 値が低く抑えられている。これはマスコンクリートで高強度が必要となる場合には有効な技術と思われる。

以上のことから、単位セメント量を低減し、Add. を用いることで水和熱を大きくすることなく高強度化できることが判った。

3.4 自己収縮ひずみ

図-5に自己収縮ひずみの測定結果を示す。まず、それぞれの無機粉体において Add. の使用の有無について見てみると、いずれの無機粉体でも Add. と併用することで自己収縮ひずみが大きくなった。バラス及びLSでは、材齢7日までは Add. の有無にかかわらずほぼ同様な収縮であったが、7日以降、Add. を併用したものがより大きな自己収縮ひずみを示した。BFS

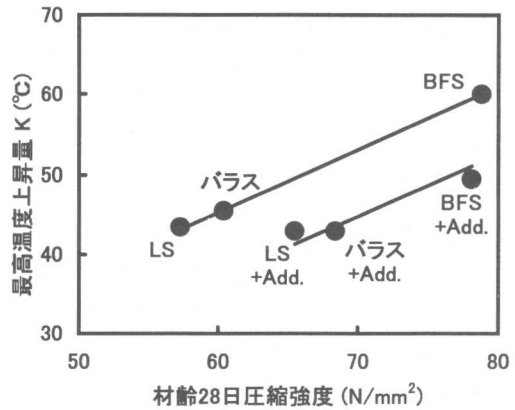


図-4 材齢28日強度と K 値の関係

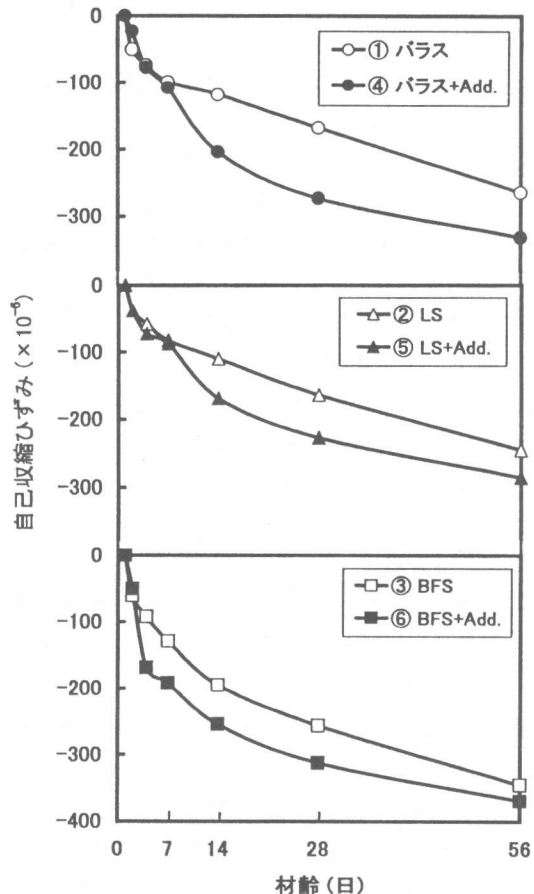


図-5 自己収縮ひずみ測定結果

ではバラス及びLSよりも若材齢で自己収縮ひずみに大きな差が見られた。Add.の使用による自己収縮ひずみの増加は使用した無機粉体により異なるが、材齢56日において $20\sim 60\times 10^{-6}$ であった。無機粉体の種類について見てみると、LSで最も自己収縮ひずみが小さく、BFSで最も大きかった。また、バラスとLSではほぼ同等の自己収縮ひずみを示したが、Add.と併用することによる自己収縮ひずみの増加はバラスの方が大きい値を示した。

なお、これらは粉体量が同一の場合の結果であり、粉体量や水結合材比を変えて強度を同一にした場合には自己収縮ひずみを小さくすることができると考えられる。図-6に各コンクリートの材齢56日における圧縮強度と自己収縮ひずみの関係を示す。いずれもほぼ直線上にあり、圧縮強度が大きいものほど自己収縮ひずみも大きくなる傾向が認められた。

コンクリートのひび割れ解析には、水和発熱量と自己収縮ひずみの双方を考慮する必要がある。高強度混和材と各種無機粉体を使用した高流動コンクリートにおいては、断熱温度上昇量、自己収縮ひずみ、及び強度の観点から、要求性能にあった配合を選択することができる可能性がある。今後は要求性能と配合との関連をさらに詳細に検討し、要求性能を満たす配合システムを確立する必要がある。

4. まとめ

- 1) 各種無機粉体を配合した高流動コンクリートに高強度混和材を用いると、同一のコンシステンシーを得るのに多くの混和剤を要したが、バラスと併用したときに良好なフローの保持性を示した。
- 2) 同一粉体量で高強度混和材を用いた場合、無機粉体の種類によらず、単位セメント量を低減しても高強度混和材を用いないものと同程度以上の強度が得られた。また、水和熱による温度上昇を同等以下に抑制でき、温度ひび割れを低減できる可能性のあることが判った。また、自

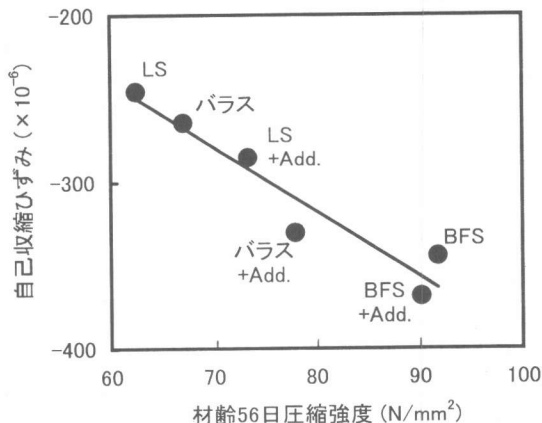


図-6 材齢56日における強度と自己収縮ひずみの関係

己収縮ひずみはより大きな値を示し、無機粉体の種類や高強度混和材の使用の有無によらず、圧縮強度とほぼ直線関係にあることが判った。

参考文献

- 1) 岡村 甫・前川宏一・小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993
- 2) 坂井悦郎・中村明則・大場陽子・大門正機：カルシウムアルミネートの水和におよぼす石灰石微粉末の影響，無機マテリアル，Vol. 4，pp. 121~126，1997
- 3) 渡邊芳春・友澤史紀・川瀬清孝・坂井悦郎：エトリンサイト系混和材を用いた現場打ち高強度コンクリートの性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 1，pp. 99~104，1993
- 4) 渡邊芳春・友澤史紀・川瀬清孝・坂井悦郎：エトリンサイト生成系混和材を用いた高強度セメントペーストの水和，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 1，pp. 359~364，1994
- 5) 山本賢司・盛岡実・渡邊芳春・坂井悦郎：環境負荷低減に対する高強度混和材の効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21，No. 2，pp. 1141~1146，1999