

論文 高炉徐冷スラグ微粉末と高炉水砕スラグ微粉末を併用した高流動コンクリートの性状

山本賢司^{*1}・盛岡 実^{*2}・前田悦孝^{*3}・松下博通^{*4}

要旨：高炉徐冷スラグ微粉末と高炉水砕スラグ微粉末を併用した高流動コンクリートの性状について検討した。高炉徐冷スラグ微粉末を所定量以上用いることにより、スランプフロー値の経時変化が小さくなった。微粉末の使用割合を変えることにより、様々な強度レベルのコンクリートを調製できる。断熱温度上昇量は単位結合材量と、自己収縮ひずみは水結合材比と、それぞれ密接に関連した。要求性能に応じて、フレッシュ性状，圧縮強度，断熱温度上昇，自己収縮ひずみの異なる高流動コンクリートの配合設計が可能となることが判った。

キーワード：高炉徐冷スラグ，高炉水砕スラグ，高流動コンクリート，要求性能

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と、耐久的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考えられる。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。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多く確保するため、多量の高炉水砕スラグ微粉末や石灰石微粉末を利用している。それに関して筆者らは高炉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高流動コンクリートに利用できる可能性を見出している¹⁾。

高炉徐冷スラグ微粉末と高炉水砕スラグ微粉末を上手く組み合わせることによって、必要に応じて様々な強度レベルの高流動コンクリートを配合設計できるものと考えられる。また、石灰石微粉末と高炉水砕スラグ微粉末を併用しても同様に様々な強度レベルの高流動コンクリートを配合設計できると考えられる。しかしながら、石灰石は我が国にとって貴重な天然資源である。セメント・コンクリート産業に対

して、以前にも増して産業副産物の有効利用が求められている。

本研究では、高炉徐冷スラグ微粉末と高炉水砕スラグ微粉末を併用した高流動コンクリートの性状について調べ、要求性能を満たす配合システムを確立するための基礎的データの収集を行った。

2. 実験

2.1 使用材料

セメントは普通セメント，骨材は川砂（表乾密度：2.62g/cm³，FM：2.71），および川砂利（表乾密度：2.64g/cm³，FM：6.73，G_{max}：25mm）を用いた。混和材は高炉徐冷スラグ，高炉水砕スラグ，石灰石微粉末（以下，CFS，BFS，LSPと表記）を用いた。プレーン比表面積は6000cm²/gであり，粒度分布はほぼ同様である。CFSの化学組成はBFSとほぼ同様であり，メリライト（ゲーレンナイト - アケルマナイト固溶体）を主成分とすることが確認されている^{1),2)}。

2.2 コンクリート配合

表 - 1 にコンクリート配合を示す。単位水量，

*1 電気化学工業（株） 青海工場 無機材料研究センター 工修（正会員）

*2 電気化学工業（株） 青海工場 無機材料研究センター 副主任研究員 工博（正会員）

*3 新日鐵高炉セメント（株） 生産技術部 リーダー 工博（正会員）

*4 九州大学大学院 工学研究院 教授 工博（正会員）

表 - 1 コンクリート配合

No.	Slumpflow (mm)	air (%)	s/a (%)	W/P (%)	Unit weight (kg/m ³)					
					W	C	Add.	S	G	S.P. (P × %)
1							CFS 300	830	772	2.18
2							BFS 300	827	770	1.60
3							LSP 300	817	760	1.40
4							CFS200+BFS100	829	771	1.95
5	650 ± 50	4.5 ± 1.5	52	30	165	250	CFS150+BFS150	829	771	1.85
6							CFS100+BFS200	828	770	1.70
7							CFS50+BFS250	828	770	1.65
8							BFS150+LSP150	822	765	1.50
9							CFS150+LSP150	824	766	1.78

単位セメント量，および混和材の使用量を一定とした。配合 1～3 では各混和材を単独で 300 kg/m³ ずつ用いた。配合 4～7 では CFS と BFS を併用し，その使用割合を変えた。配合 8 と 9 では BFS と LSP，CFS と LSP を併用し，それぞれ 150kg/m³ ずつ用いた。これらのコンクリートでは混和材の密度が異なるため，骨材の単位量が若干異なるが，単位粉体量や水粉体比が同一という点で，基本的に同一配合のコンクリートとみなせる。練混ぜ直後のスランプフロー値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（以下，S.P.と表記）の添加率を調整した。CFS を使用した配合では，それをういないものより S.P.の添加率が多めとなった。これは CFS からの溶出イオン量が BFS や LSP より多いことが原因として考えられる^{2),3)}。

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，スランプフロー値を測定した。また，ASTM C 403 に準じて，5mm の篩でウェットスクリーニングしたモルタルにおける凝結の始発，終結時間を測定した。

(2) 圧縮強度

JIS A 1108 に準拠し，圧縮強度を測定した。

(3) 断熱温度上昇

150 × 200mm の鋼製容器に 3 リットルの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 とした。

(4) 自己収縮ひずみ

JCI 自己収縮研究委員会報告書に準拠し，コンクリートの自己収縮ひずみを測定した。

3. 結果と考察

3.1 フレッシュ性状

図 - 1 にスランプフロー値の経時変化を示す。まず各混和材を単独で用いた図 - 1 (a) について見ると，LSP300 ではスランプフロー値の経時変化が最も大きく，30 分後には 600mm より小さい値となった。BFS300 では LSP300 と比べてスランプフロー値の経時変化が小さく，60 分後まで 600mm 以上の値を示した。CFS300 では BFS300，LSP300 よりもスランプフロー値の経時変化が小さく，120 分後まで 600mm 以上の値を示した。

次に CFS と BFS を併用した図 - 1 (b) では，CFS を含まない BFS300 と比較して，CFS を 50kg/m³ しか使用していない CFS50+BFS250 でもややスランプフローの経時変化が小さくなった。CFS を 100kg/m³ 使用した CFS100+BFS200 では，かなりスランプフロー値の経時変化が小さくなった。しかし，それ以上に CFS の使用量が増しても大きな差は認められなかった。スランプフロー値の経時変化を小さくする観点からは，CFS の使用量は 100kg/m³ 以上であれば充分であると考えられる。また，2 種類の混和材を 150kg/m³ ずつ併用した図 - 1 (c) を見ると，CFS と他の混和材を併用した CFS+BFS や CFS+LSP では，CFS を用いない BFS+LSP よりスランプ

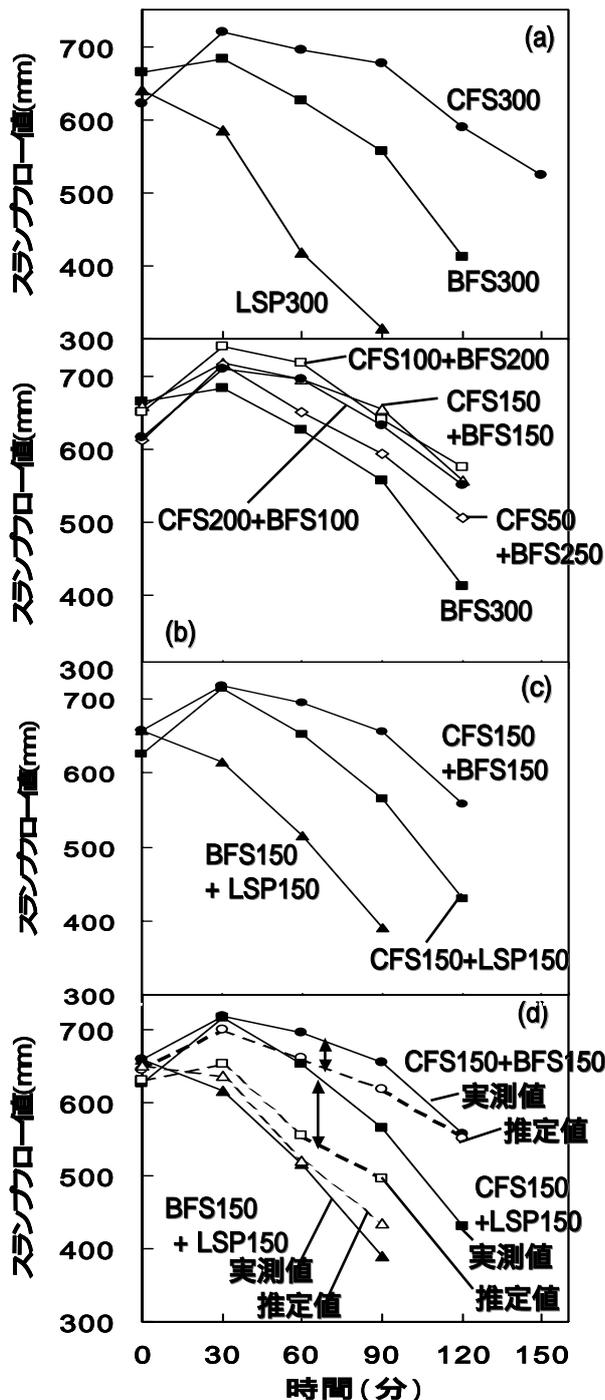


図 - 1 スランプフロー値の経時変化
 (a) 混和材単独, (b), (c) 混和材併用
 (d) 実測値と推定値の比較

フロー値の経時変化が小さくなった。さらに前二者を比較すると、CFS+BFS では CFS+LSP よりも経時変化が小さく、混和材をそれぞれ単独で使用した場合の傾向と一致した。CFS を他の混和材と併用した場合でも、CFS の使用量に応じてスランプフロー値の経時変化が小さくな

った。

以上のように、CFS を配合した高流動コンクリートではスランプフロー値の経時変化が小さくなった。その理由として、S.P.添加率が多いことが考えられる。そこで、S.P.添加率とスランプフロー値の関係について検討した。

ここで、各配合の S.P.添加率について見ると (表 - 1 参照)、混和材を併用した場合の S.P.添加率は、混和材をそれぞれ単独で使用した場合の平均値とほぼ一致している。もし、スランプフロー値の経時変化が S.P.添加率のみに支配されるとすれば、混和材を併用した場合の経時変化は、単独で使用した場合の平均値に近くなるはずである。そこで図 - 1 (a)より、混和材単独で使用した場合の組み合わせから計算によって求めた平均値を、混和材を併用した場合の推定値とみなし、実測値 (図 - 1 (c))と比較した。すなわち、CFS300 と BFS300 の平均値が CFS150+BFS150 の推定値、という具合である。

図 - 1 (d)に実測値と推定値の比較を示す。図中の実線が実測値であり、破線が推定値である。BFS150+LSP150 の実測値は、推定値と近似している。すなわち、この系ではスランプフロー値の経時変化は S.P.添加率に依存している。一方、CFS150+BFS150 や CFS150+LSP150 では、実測値と推定値が近似せず、いずれも実測値の方が経時変化が小さくなった。つまり、これらは S.P.添加率に依存しない。これらは CFS を配合する点が共通している。CFS は S.P.が添加されていない系でもセメント中の C_3A の初期水和を強く抑制し、流動性を保持することが知られている^{2),3)}。S.P.が添加されている本系においてもその効果が発揮され、スランプフロー値の経時変化を小さくする効果を生んだものと考えられる。

なお、原因の詳細は不明であるが、CFS を用いたものは、スランプフロー値が練混ぜ直後から 30 分後に一旦増大した後、減少した。しかし、CFS を用いた場合には粘性がやや大きくなる²⁾ため、スランプフロー値が増大したときでも材料分離は見られなかった。

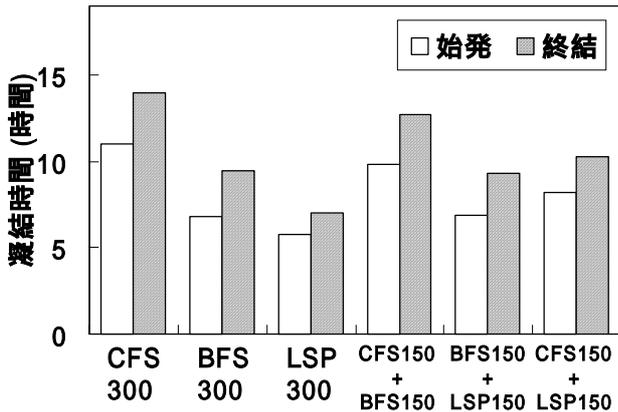


図 - 2 凝結時間

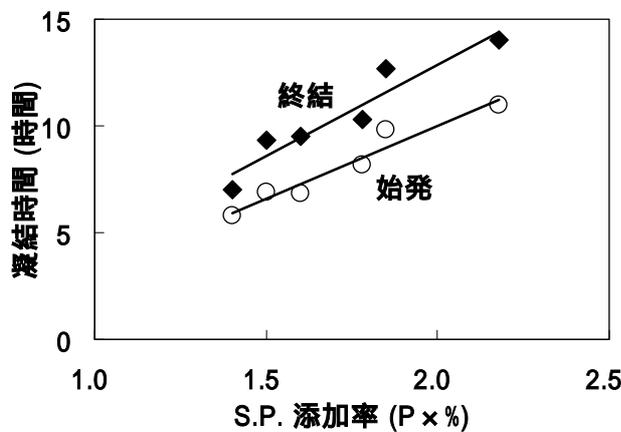


図 - 3 S.P.添加率と凝結時間の関係

図 - 2 に凝結の始発時間と終結時間を示す。各混和材を単独で用いた場合、LSP300、BFS300、CFS300の順に凝結時間が長くなった。2種類の混和材を併用した場合にはそれぞれを単独で使用したときの中間的な値を示した。凝結時間はS.P.添加率と関連が深いように見える。そこで、S.P.添加率と凝結時間の関係について整理した。

図 - 3 に S.P.添加率と凝結時間の関係を示した。いずれの配合でも始発時間、終結時間ともほぼ直線上にあり、凝結時間は S.P.添加率に支配されることが判った。

以上より、CFS と BFS の併用により、フレッシュ性状の異なる高流動コンクリートを配合設計できることが判った。なお、CFS300 では凝結時間が長くなっており、気温の低い冬季では施工に影響することが考えられるが、材齢 1 日以下の強度発現性は、LSP300 と同等以上である

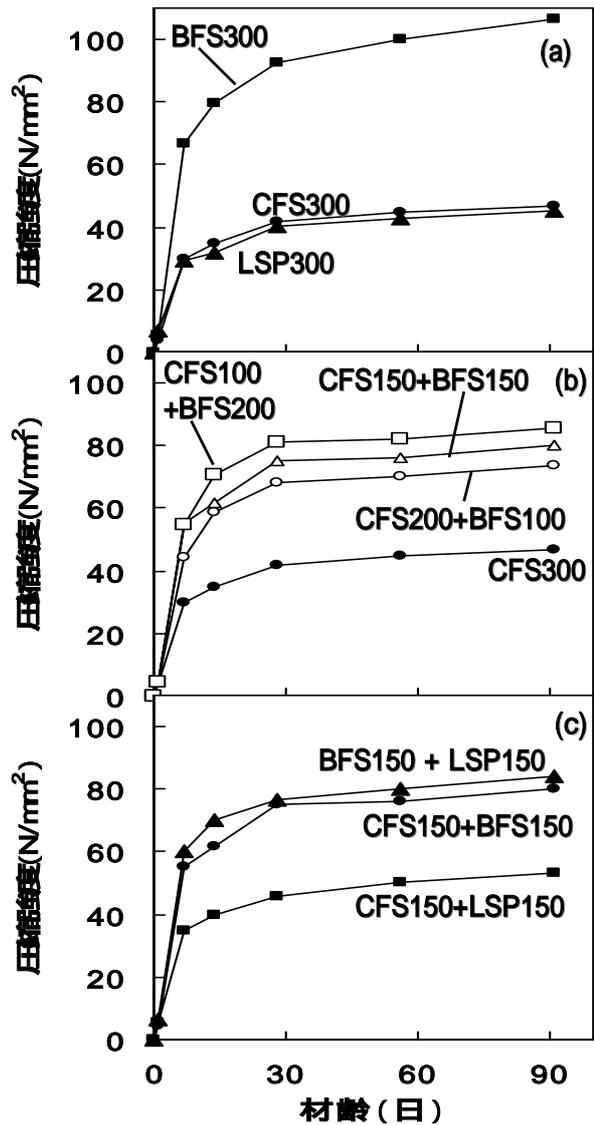


図 - 4 圧縮強度

(a) 混和材単独、(b)、(c) 混和材併用

ことが確認されている^{2),3)}。

3.2 圧縮強度

図 - 4 に圧縮強度を示す。各混和材を単独で使用した図 - 4 (a) では、CFS300 や LSP300 は材齢 28 日で 40 N/mm² 程度、材齢 91 日で 45 N/mm² 程度の値を示した。BFS300 では材齢 7 日で 60 N/mm² を超え、その後の強度増進も大きく、材齢 91 日では 100 N/mm² を超えている。

次に CFS と BFS を併用した図 - 4 (b) では、BFS の使用量が多くなるにつれて、材齢 7 日以下の圧縮強度が高い値を示した。また、2種類の混和材を 150kg/m³ ずつ併用した図 - 4 (c) で

は、BFS+LSP と CFS+BFS がほぼ同様の強度を示し、CFS+LSP より高い値を示した。これは BFS が潜在水硬性により強度増進を示すのに対し、CFS と LSP は強度発現性の点では不活性と考えられるためである^{4),5)}。CFS と BFS の併用により、様々な強度レベルの高流動コンクリートを配合設計できることが判った。

3.3 断熱温度上昇

図 - 5 に断熱温度上昇の結果を示す。最高温度上昇量 K 値に着目すると、各混和材を単独で使用した図 - 5 (a)では、BFS300 で最も高く、CFS300 と LSP300 でほぼ同等となっている。2種類の混和材を 150kg/m^3 ずつ併用した図 - 5 (b)では、CFS+BFS、BFS+LSP でほぼ同等となり、CFS+LSP より大きな値を示した。これは BFS による水和発熱の影響が大きいためと考えられる。つまり、BFS は結合材とみなすことができるのに対して、CFS や LSP はフィラーとみなすことができるためである。そこで、単位結合材量と K 値の関係について整理した。ここでは、セメントと BFS の合計を結合材とした。

図 - 6 に単位結合材量と K 値との関係を示した。いずれもほぼ直線上にあり、単位結合材量が多いほど K 値が大きくなった。以上より、CFS と BFS を併用し、それらの使用割合を変えることにより、最高温度上昇量を制御できることが判った。これは部材厚が厚く、温度ひび割れが問題となる場合等に有用と考えられる。

3.4 自己収縮ひずみ

図 - 7 に自己収縮ひずみを示す。各混和材を単独で用いた図 - 7 (a)では、LSP300、CFS300、BFS300 の順に自己収縮ひずみが大きくなった。BFS300 については混和材自体の水和によるものと考えられるが、LSP300 と CFS300 の間で自己収縮ひずみに差が見られた理由については、現在のところ不明である。

2種類の混和材を 150kg/m^3 ずつ併用した図 - 7 (b)では、CFS+BFS や BFS+LSP ではほぼ同等の値を示し、CFS+LSP の場合より大きな収縮を示した。これは BFS が結合材とみなせるのに対

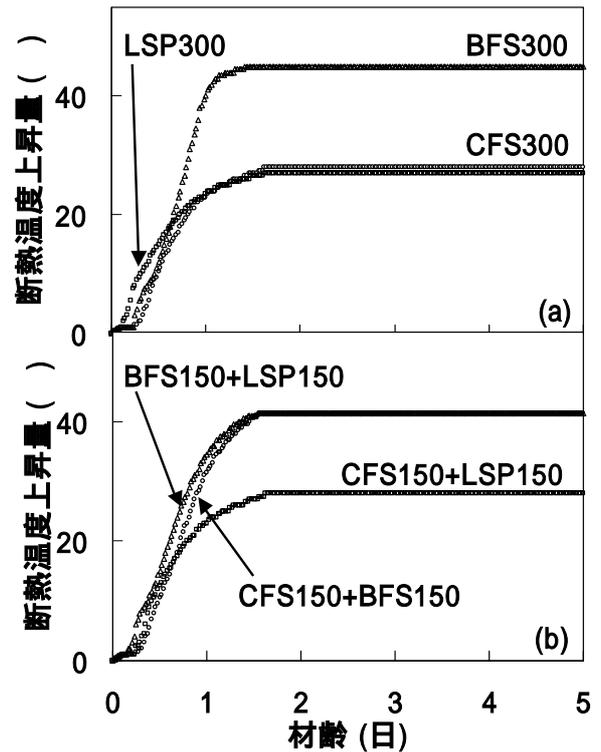


図 - 5 断熱温度上昇
(a)混和材単独、(b)混和材併用

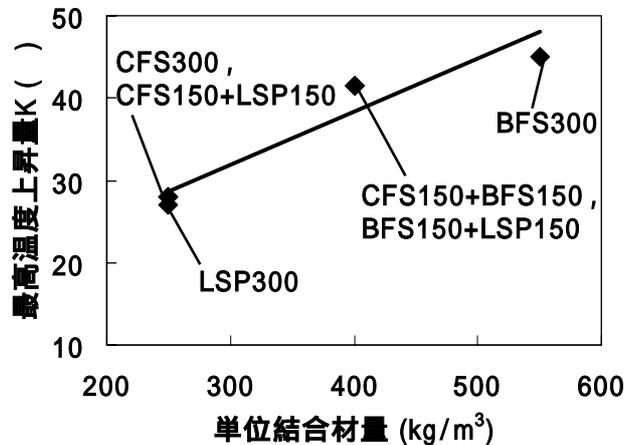


図 - 6 単位結合材量と K 値の関係

して、CFS や LSP がフィラーとみなせることが影響したものと考えられる。すなわち、BFS を用いた系と、BFS を用いずに CFS や LSP だけを用いた系では、水粉体比 (W/P) が同一であっても水結合材比 (W/B) が異なることが影響している。水結合材比が自己収縮ひずみに大きな影響を及ぼすためである⁶⁾。そこで、水結合

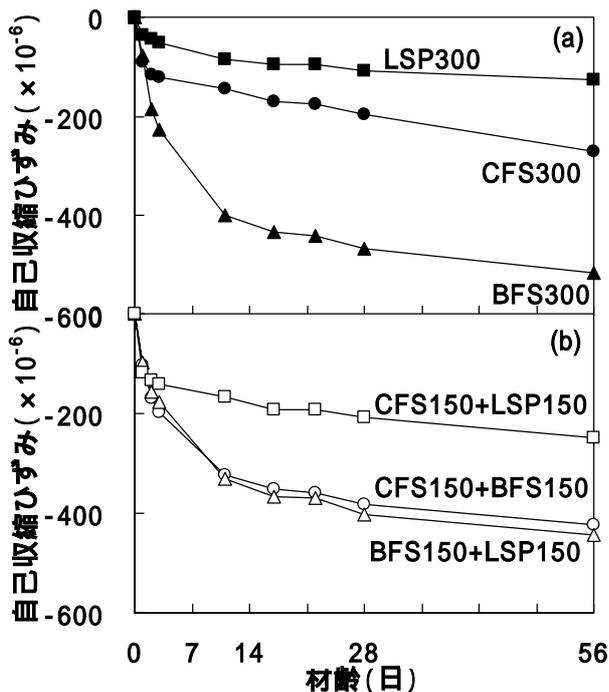


図 - 7 自己収縮ひずみ
(a)混和材単独, (b)混和材併用

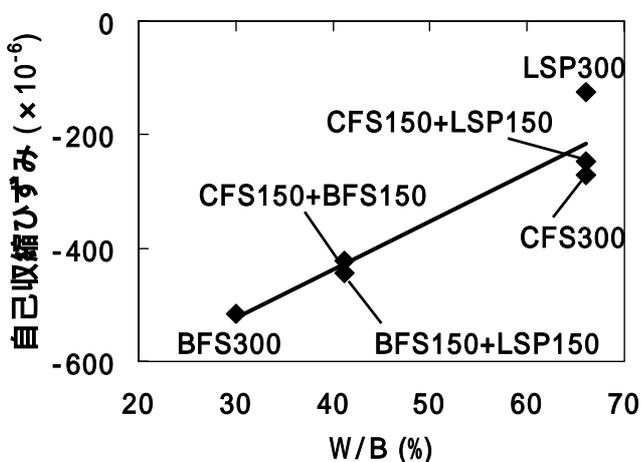


図 - 8 水結合材比と自己収縮ひずみの関係

材比と自己収縮ひずみの関係について整理した。

図 - 8 に水結合材比と材齢 56 日における自己収縮ひずみの関係を示した。水結合材比が大きくなるほど自己収縮ひずみが小さくなる傾向にあり、混和材として LSP のみを用いた LSP300 では特に収縮が小さい結果となった。CFS と BFS を併用し、それらの使用割合を変えることで、自己収縮ひずみも制御できることが判った。

以上より、CFS と BFS を併用することによ

り、要求性能に応じた高流動コンクリートの配合設計が可能となることが判った。

4. まとめ

高炉徐冷スラグ微粉末と高炉水砕スラグ微粉末を併用した高流動コンクリートの性状について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 高炉徐冷スラグ微粉末を所定量以上用いることにより、スランプフロー値の経時変化が小さくなった。
- (2) 2 種類の微粉末の使用割合を変えることにより、様々な強度レベルのコンクリートを調製できることが判った。
- (3) 断熱温度上昇は単位結合材量と、自己収縮ひずみは水結合材比と、それぞれ密接に関連することが明らかとなった。
- (4) 要求性能に応じて、フレッシュ性状、圧縮強度、断熱温度上昇、自己収縮ひずみの異なる高流動コンクリートの配合設計が可能となることが判った。

参考文献

- 1) 盛岡実ほか：高炉徐冷スラグ微粉末の高流動コンクリートへの検討，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.44-49，2000
- 2) 盛岡実ほか：高炉徐冷スラグ微粉末の流動性保持効果とその機構，コンクリート工学論文集，Vol. 14，No.1，pp. 67-74，2003
- 3) 盛岡実ほか：高炉徐冷スラグ微粉末が流動性におよぼす影響とその機構，セメント・コンクリート論文集，No. 56，pp. 72-78，2002
- 4) 坂井悦郎ほか：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
- 5) 依田彰彦，枝広英俊：高炉徐冷スラグ粉末を混和材として用いたコンクリートについて，セメント技術年報，No.34，pp.160-163，1980
- 6) 田澤栄一，宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響，土木学会論文集，No.502 / -25，pp.43-52，1994