

論文

[1026] 二成分系のハイパフォーマンスコンクリートの配合に関する一考察

正会員 ○中島良光 (前田建設工業 技術研究所)  
 梶田秀幸 (前田建設工業 技術研究所)  
 正会員 三浦信一 (前田建設工業 技術研究所)  
 正会員 牧野英久 (前田建設工業 技術研究所)

1. はじめに

ハイパフォーマンスコンクリート(以下、HPCと略す)は、コンクリートの耐久性向上、施工の合理化を目的として、東京大学の岡村研究室で開発されたコンクリートである<sup>[1]</sup>。HPCのフレッシュな状態における最大の特徴は、流動性、材料分離抵抗性、充填性に優れ、振動締め固めをせずに型わくの隅々に行き渡ることである。

HPCは、混和材料として高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いる場合(三成分系のHPC)と、高炉スラグ微粉末のみを用いる場合(二成分系のHPC)が報告されている。筆者らはこのうち、二成分系のHPCを用いて実物大施工実験を行った<sup>[2]</sup>。本研究は、この実験に用いた二成分系HPCの配合および練りませ方法などが、フレッシュコンクリートの性状とその経時変化に及ぼす影響についていくつかの検討を行ったので、その結果を報告するものである。

2. 実験方法

本実験ではHPCのフレッシュ性状に対し、①高性能AE減水剤の添加量による影響、②高炉スラグ置換率(Sg/C+Sg)の影響、③細骨材率(s/a)の影響、④練りませ方法の影響、の4つについて検討を行なった。これらの要因の水準を表-1に示す。また、基本配合となる水準での配合表と、用いた各材料の物性を表-2に示し、このときの試験結果を表-3に示す。

練りませは100(強制練り2軸ミキサーを用い、図-1に示す手順を標準として練りませた。試験項目として、スランプフロー試験、VF試験、ブリージング試験を行なった。スランプフローとVF試験については、練り上がり後30分おきに経時変化を測定した。

なお、今回行なったVF試験では、図-2に示す装置の円筒容器(A室)内に三層に分けてコンクリートを詰め、円筒を回転させることにより円筒下部の流出孔を開き、無振動でコンクリートを流出させ、流動が停止した時点での円筒容器内のコンクリート上面の下がり測定し、これをVF(S)値とした。そしてこのVF(S)値をコンクリートの材料分離抵抗性および充填性の指標とすることにした。

表-1 実験の要因と水準

要因	高性能AE減水剤 添加量(重量比) (対結合材、%)	高炉スラグ置換率 (体積比、%) Sg/C+Sg	細骨材率 (%) s/a	練りませ方法 (空練りの有無)
範囲	1.416%~1.475%	50.0%~75.0%	50.3%~40.3%	
基準値	1.428%	70.0%	50.3%	空練り有り

表-2 二成分系HPCの基本配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプフ ローの範 囲 (cm)	空気量 の範 囲 (%)	水結合 材比 (%)	細骨 材率 (%)	高炉ス ラグ置 換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
						水	セメント	高炉ス ラグ	細骨材	粗骨材	混和剤	混和剤
						W	C	Sg	S	G	Add1	Add2
20	55±5	2±1	33.6	50.3	70.0	178	169	360	808	823	0.02	8.43

C：普通ポルトランドセメント、比重：3.16、比表面積：3300cm<sup>2</sup>/g

Sg：高炉スラグ、比重：2.91、比表面積：6000cm<sup>2</sup>/g

S：陸砂：砕砂=5：5、比重：2.57、FM：2.83

G：川砂利：碎石=4：6、比重：2.65、FM：6.73

Add1：セルローズ系増粘剤、Add2：高性能AE減水剤

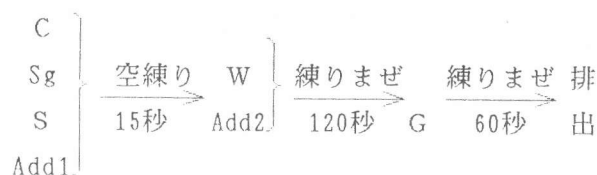


図-1 標準練りませ手順

表-3 基本配合の二成分系HPCの品質

スランプフ ロー (cm)	空気量 (%)	V F 値 (cm)	温度 (°C)	28日圧縮 強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
56.0	2.6	23.0	17.0	522

### 3. 実験結果

#### 3.1 高性能AE減水剤の添加量がスランプ フロー、VF(S)値に及ぼす影響

高性能AE減水剤の添加量がHPCの性状に及ぼす影響を把握するため、高性能AE減水剤添加量のみを変化させて実験を行った。配合は基本配合を用い、練りませ方法も標準のものとした。

図-3に高性能AE減水剤添加量とスランプフロー、VF(S)値の関係を示した。

高性能AE減水剤の添加量を増加させると、スランプフローは増加してある値に収束するが、VF(S)値は上に凸の曲線を描く。つまり、高性能AE減水剤を多量に添加した場合、つまりこの曲線の頂点より右にいくと、VF(S)値は急激に減少し、モルタルと粗骨材の分離現象が見られた。さらに、このときには図-4に示した様に静的分離を示すブリーディング率も高くなっており、これらの結果から材料分離が生じていることがわかる。

HPCの流動性と充填性を確保するためには、材料分離を生じない範囲でできるだけスランプフ

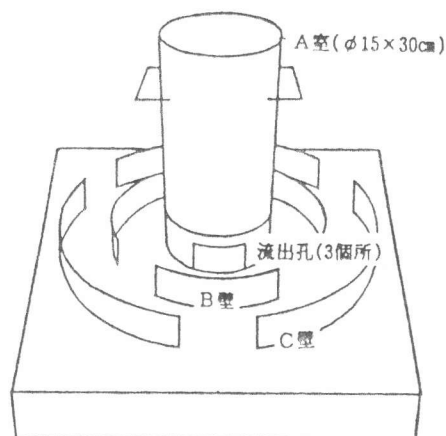


図-2 VF試験器

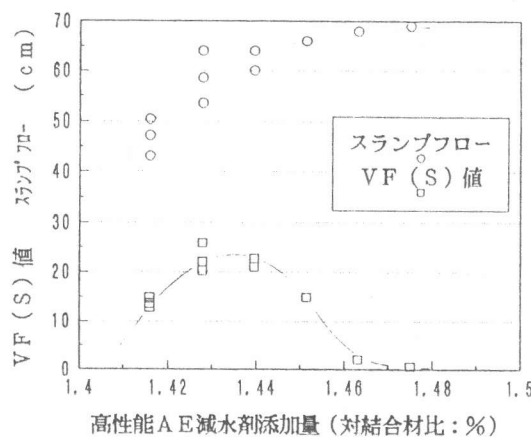


図-3 高性能AE減水剤添加量とスランプフロー、VF(S)値との関係

ローとVF(S)値の大きい配合を選定するのが望ましい。したがって、高性能AE減水剤はこの曲線の頂点より左側に収まる範囲内で添加するべきであると思われる。

### 3.2 スランプフローとVF(S)値の経時変化

練り上がり時におけるスランプフローとVF(S)値の関係を図-5に示した。

3-1で述べたように高性能AE減水剤の添加量を増加させるとVF(S)値は上に凸の曲線を描き、スランプフローは単調増加しながらある値に収束する傾向がある。したがって練り上がり時におけるスランプフローとVF(S)値の関係は図-5に示したような上に凸の曲線を描く。この曲線の頂点付近では比較的データのバラツキも小さく、また、ブリージングも少ないことから、流動性と充填性、および材料分離抵抗性に優れた状態にあると考えられる。

HPCのフレッシュ時の性状が時間経過とともにどのように変化するか検討するため、スランプフローとVF(S)値を30分間隔で測定した。練り上がり後の経過時間とスランプフロー、VF(S)値の関係を図-6に示した。

ケース1は高性能AE減水剤を1.416%添加した場合、ケース2は高性能AE減水剤を1.440%添加した場合であり、どちらも基本配合を用い、標準練りませ方法で練りませている。

スランプフローは、練り上がり時点での値に拘らず、練り上がり後30分までに10cm以上増大した。しかし、練り上がり時点でのスランプフローが大きい方が、増大後、もとの大きさに戻るまでの時間は長くかかる傾向が見られた。これに対しVF(S)値は、スランプフローの大きい方がロスが早い傾向が見られた。

スランプフローとVF(S)値の関係の経時変化を図-7に示した。

ケース1のように、スランプフローの低下とともにVF(S)値も同時に低下していくケースでは、材料分離が認められず、ブリージングも2%以内と少ない。これに対し、ケース2のよう

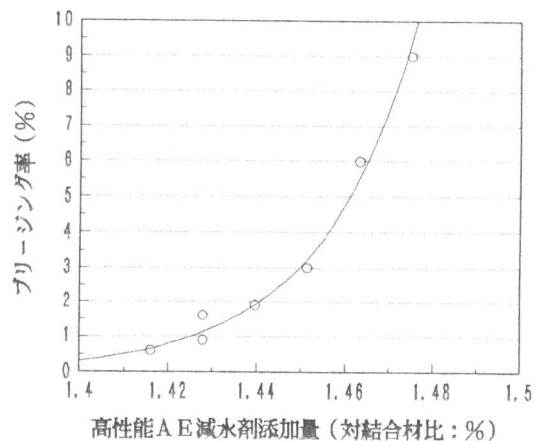


図-4 高性能AE減水剤添加量とブリージング率との関係

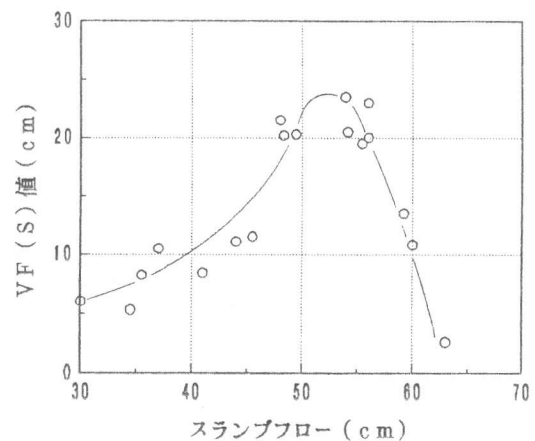


図-5 練り上がり時におけるスランプフローとVF(S)値との関係

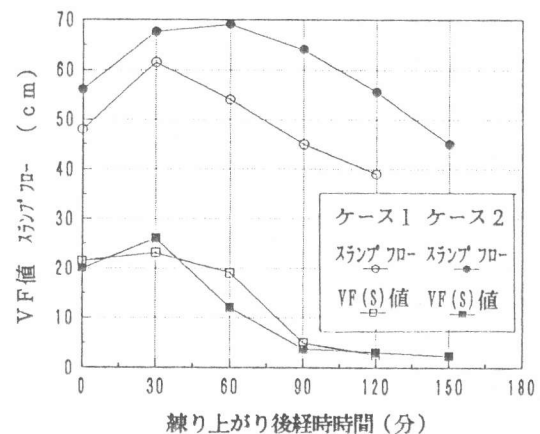


図-6 練り上がり後経過時間とスランプフロー、VF(S)値との関係

にスランプフローは大きいままなのにVF(S)値が大きく低下するケースでは、ブリージングが2~10%と大きくばらつき、ブリージングが大きい場合には材料分離が認められた。

これらのことから、スランプフローとVF(S)値の関係およびその経時変化とブリージング率との間には密接な関係があることがわかった。

### 3.3 高炉スラグ置換率がスランプフロー、VF(S)値に及ぼす影響

高炉スラグ置換率がHPCの性状にどのような影響を及ぼすかを検討するため、結合材体積量一定のもとで高炉スラグ置換率を結合材の50%から75%まで変化させて実験を行った。その他の配合要因は基準配合を用いた。練りませ方法も標準の方法を用いた。図-8に高炉スラグ置換率とスランプフロー、VF(S)値との関係を示した。

スランプフローは高炉スラグ置換率の増加にともなって増大し、一方、VF(S)値はほぼ一定値を保っており、材料分離は認められない。したがって、本実験の範囲では高炉スラグ置換率は70%程度が良いと考えられる。

### 3.4 細骨材率がスランプフロー、VF(S)値に及ぼす影響

細骨材率がHPCの性状にどのように影響するかを検討するため、細骨材率を40.3%に下げた実験を行った。図-9に細骨材率を下げた場合のスランプフローとVF(S)値との関係を示した。

s/aを下げた場合、図-5に示した曲線に比べ、頂点の位置はかなり低く、また、スランプフローの小さい側によっている。このようにs/aが変わるとスランプフローとVF(S)値の関係は上下左右にスライドすると考えられる。

このように、細骨材と粗骨材を合わせた粒度分布が変わること、例えばs/aの変化、骨材の変更などによってHPCのコンシステンシーは大きく変動する。そしてそれぞれの骨材分布の系の中で高性能AE減水剤添加量の変化により図-9のような曲線を描き、その中で頂点となる最適配合が存在すると考えられる。

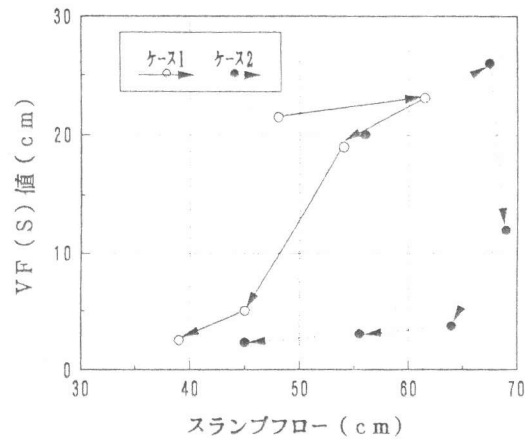


図-7 経時時間に伴うスランプフローとVF(S)値との関係の変化

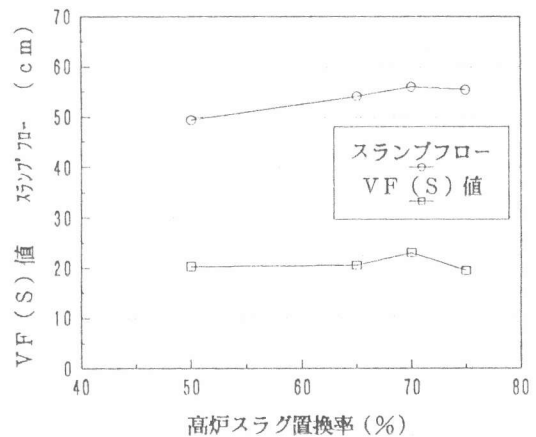


図-8 高炉スラグ置換率とスランプフロー、VF(S)値との関係

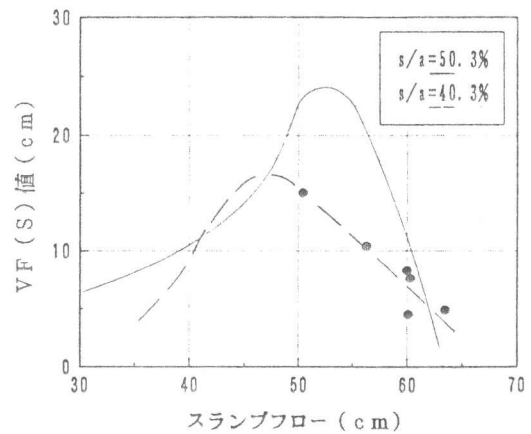


図-9 細骨材率を下げた場合のスランプフローとVF(S)値との関係

### 3. 5 練りませ方法がスランプフロー、VF(S)値に及ぼす影響

練りませ方法の違いがHPCの性状にどのような影響を及ぼすかを検討するために、基準配合を用いて、標準の練りませ方法と空練りを行わない方法(全練りませ時間は3分15秒で等しい)とで実験を行った。

空練りを行った場合、スランプフローは56cm、VF(S)値は20~23cmであったが、空練りを行わない場合には、スランプフローが約35cmに低下し、VF(S)値も5~8cmに低下した。このことから、本実験の範囲では、HPCの製造に当たっては、粉体量が多いことから練り混ぜの影響が非常に大きいといえる。また、実機の場合には空練りを行わない方が良好な結果を得られる場合もあり、これらのことから、HPCの練りませ方法については、ミキサーの種類、材料投入順序を含めた検討が今後必要であると考えられる。

## 4. 考察

以上の結果をもとにしてHPCの流動性、材料分離抵抗性および充填性について考察する。

コンクリートの充填性は流動性を高くし、かつ、分離抵抗性を高くすることにより向上するといえる。ここで、流動性および材料分離抵抗性は粘性によって変動する。つまり、粘性が高くなると流動性は低下し、材料分離抵抗性は向上する。逆に粘性が下がれば流動性は向上し、材料分離抵抗性は低下する。つまり高い充填性を発揮するためには、流動性と材料分離抵抗性をともに満足するようにコンクリートの粘性をコントロールすることが必要であると考えられる。そして、この流動性を評価する方法としてスランプフロー試験、材料分離抵抗性を評価する方法としてVF試験を採用し、両者を組み合わせることによってHPCの充填性を評価することができると考えられる。

## 5. 配合設計および品質管理への応用

以上の考察より、2成分系のHPCの配合設計への応用と品質管理への応用を考えてみる。

### 5. 1 配合設計への応用

ここまで述べてきたように、HPCの充填性はその粘性と流動性のバランスに大きく依存しているものと考えられる。そこで、施工条件に合わせた最適なHPCの配合を見出すためのポイントとして次の3点を挙げる事ができる。

#### (1) 高性能AE減水剤添加量について

高性能AE減水剤添加量は、スランプフローとVF(S)値との関係から描かれる曲線(図-5)の頂点近傍よりやや左側になるように設定する方が良い。その理由は、

- ① 頂点近傍を過ぎると、高性能AE減水剤の効果がきわめて敏感になり、計量誤差等により急に性状が変わる恐れがある。
- ② 生コン工場から現場まで時間がかかる場合には、3. 2に述べたような経時変化のことを考慮して、図-5に示したような曲線の頂点より左側の方が安全である。

#### (2) 高炉スラグ置換率について

高炉スラグ置換率は高炉スラグの粉末度によって変わってくるものと思われる。すなわち、高炉スラグの粉末度によってHPCに生じる粘性の高さが異なるため、これを適当なものとするには、高炉スラグ置換率を変える必要があると考えられる。

### (3) $s/a$ について

VF(S)値は粗骨材の形状(砕石か川砂利か)によってかなり値が違ってくることが明らかとなっている<sup>[3]</sup>。また、骨材の粒度分布によっても影響されると考えられる。したがって使用する骨材の種類、粒度分布によって最適な $s/a$ は異なるが、HPCの持つ粘性を保持するためには、 $s/a$ をある程度高めてやることは有効であると考えられる。

### 5.2 品質管理への応用

これまでの実験結果から、スランプフローとVF(S)値の関係を捉えておくとHPCの経時変化の傾向やブリージング等に代表される材料分離抵抗性の大小がおおよそ掴めると考えられる。このような結果をもとに、HPCの製造現場においてVF試験およびスランプフロー試験を行えば、HPCの品質管理にも有効に役立てられると考えられる。

## 6. まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりである。

- ① HPCのフレッシュコンクリートの性状について、いくつかの配合要因を変えて実験を行った。その結果、配合要因の適性値と経時変化への影響を把握することができた。
- ② コンクリートの練りませ方法、特に空練りの影響がコンクリートの性状に大きく影響していることが分かった。
- ③ スランプフローとVF(S)値との関係に着目することによってコンクリートの流動性と材料分離抵抗性のバランスがコンクリートの充填性に関係があることを示唆できた。
- ④ VF試験を行うことによってスランプ、スランプフローだけでは分からなかったHPCの材料分離抵抗性を定量的に把握することができた。また、スランプフロー試験とVF試験を組み合わせることにより、HPCの充填性を表現することができると思われる。

以上、二成分系HPCについて、配合、練りませ方法について検討し、また、これらの結果に基づいた配合設計への応用、品質試験への応用について考察を加えた。その結果、VF試験機を用いて配合設計、品質管理を行うことができるとの結論を得た。今後、粉体の種類、粉末度、配分、水との比率や骨材の粒度分布等がHPCの流動性と材料分離抵抗性にどのように関与するのかを明らかにする必要があると考えられる。

本研究では二成分系HPCのフレッシュな状態の性状についてのみ言及してきたが、硬化後の性状に関しては次の機会に発表したいと考えている。

最後に、ハイパフォーマンスコンクリートを発案された東京大学 岡村教授、小沢講師に敬意を表わすとともに、研究全般にわたり御教示、御鞭撻を賜ったことに感謝いたします。また、実験においてご協力を頂いた小野田セメントの方々に感謝を表します。

### 参考文献

- 1) 小沢一雅・前川宏一・岡村 甫：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.1、pp.699-704、1989.6
- 2) 三浦信一・牧野英久・小野義徳・小沢一雅：二成分系のハイパフォーマンスコンクリートの実物大模型による施工性の検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、1991.6
- 3) 牧野英久・渡部 正・中島良光：高流動化コンクリートのワーカビリティと材料分離抵抗性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.297-300、1990.6
- 4) 泉 達也・前川宏一・小沢一雅・国島正彦：固体間摩擦抵抗に及ぼすベースト効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.2、pp.309-314、1988.6