

論文

[1011] 流動化高炉スラグ置換コンクリートのワーカビリティに関する研究

正会員 西林新蔵 (鳥取大学工学部)

正会員 井上正一 (鳥取大学工学部)

正会員 ○吉野 公 (鳥取大学工学部)

湯谷政博 (やまこう建設)

1. まえがき

最近、アルカリ骨材反応あるいは塩害などによる劣化が原因となったコンクリートの耐久性の低下が問題となってきているが、その対応策の一つに高炉スラグ微粉末をセメントの一部として置換した高炉スラグ置換コンクリートの使用があげられている。この高炉スラグ置換コンクリートを流動化することは、その施工性の改善、あるいは硬化後の品質の向上を図るうえで極めて有効な手段であると考えられる。

本研究は、高炉スラグ置換コンクリートの施工性を改善する手段として、流動化剤および高性能AE減水剤を添加した場合のコンクリートのワーカビリティを把握する目的で計画したもので、具体的には高炉スラグの置換率あるいは混和剤の種類等の要因が流動化した高炉スラグ置換コンクリートのワーカビリティにおよぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した普通ポルトランドセメントの物理的性質を表-1に示す。また、高炉スラグ微粉末 (以下スラグと称す) は急冷された高炉スラグをローラミルで微粉砕したものであり、その物理的性質および主要化学成分を表-2に示す。骨材には、粗骨材として碎石 (最大寸法: 20mm, 比重: 2.72, 吸水率: 0.74%, F.M.: 6.54) を、細骨材として砕砂と陸砂を混合して土木学会標準粒度範囲に入るように調整したもの (比重: 2.64, 吸水率: 1.65, FM: 2.73%) を用いた。また、化学混和剤にはAE減水剤、流動化剤および2種類の高性能AE減水剤を選んだ。化学混和剤の主要成分を表-3に示す。

表-1 セメントの物理的性質

比重	粉末度 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	凝結時間 (時間-分)		圧縮強さ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )		
		始 発	終 結	3 日	7 日	28日
3.15	3150	2-35	3-40	125	230	415

2.2 実験条件

本実験では、単位結合材量を一定 ( $350 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) とし、スラグ置換率は、0, 50, 70%の3水準とした。流動化コンクリートのベースコンクリートはAE減水剤を添加したAEコンクリートとし、そのスランプの目標値は  $12 \pm 1 \text{ cm}$ 、

表-2 高炉スラグ微粉末の性質

比重	粉末度 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	化 学 成 分 (%)					
		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$
2.89	4540	31.9	13.4	0.2	42.1	6.1	2.0

空気量の目標値は  $5.0 \pm 0.5$  %とした。流動化剤の添加時期は、ベースコンクリート練上り後 60 分における後添加とし、流動化剤の添加量は、流動化直後のスランプが  $18 \pm 1$  cm となるよう試し練りで決定した。一方、高性能AE減水剤の場合は、まずスランプ  $18 \pm 1$  cm のプレーンコンクリートの単位水量を試験練りによって求め、その単位水量を 20 %減少させた水量で、スランプ  $18 \pm 1$  cm、空気量  $5.0 \pm 0.5$  %となるように高性能AE減水剤の添加量を決定した。なお、細骨材率については試験練りによってあらかじめ決定した最適細骨材率とした。

表-3 化学混和剤の主要成分

種類	記号	主要成分
AE減水剤	AEWR	リグニンスルホン酸塩、ポリオール複合体
流動化剤	SP	ナフタリンスルホン酸塩カルシウム系化合物
高性能AE減水剤	AE I	変性リグニン、アルキルアリルスルホン酸、活性ポリマーの複合物
高性能AE減水剤	AE II	芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物

### 2.3 試験方法

試験は、スランプ試験、空気量試験を流動化後 120分まで行い、VB試験、縮固め係数試験、分離性試験および球引上げ式粘度計によるレオロジー量の測定を流動化直後の試料について行った。

分離性試験は直径 15 cm、高さ 90 cm (30cm×3)の円柱型枠にコンクリートを入れ、振動台 (6000 rpm)で 60 秒振動を与えた後、30 cm 間隔の上層、中層、下層の各層の全試料に対する洗い分析試験の結果から判定した。また、レオロジー量の測定は、コンクリートをウェットスクリーニングして得られたモルタルに対して行った。なお、経時変化の測定は、練り板上にビニールシートをかけて静置しておいた試料を各測定時に練り直した後にいった。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 スラグ置換率が配合に及ぼす影響

図-1は縦軸にベースコンクリートの単位水量を、横軸にスラグ置換率をとって、これらの関係を示したものである。図より、スラグ置換率の増加に伴って所定のスランプを得るために要する単位水量は減少することがわかる。高炉スラグ微粉末はガラス質で平滑な粒子表面を有しているので、スラグ置換率に応じた減水効果が認められるとの報告が多い。また、土木学会の高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案)によれば、スラグ置換率が 10 %大きくなるごとに 1.5 kg の減水量となることを示している<sup>1)</sup>。本研究においても、スラグ置換率の増加に伴って土木学会指針とほぼ同じ程度の減水効果が得られることが認められた。

図-2はスランプ  $18 \pm 1$  cm を得るのに要した流動化剤および高性能AE減水剤の添加量とスラグ置換率との関係を示したものである。図より、スラグ置換率の増加に伴って剤の添加量は減少した。これは、ス

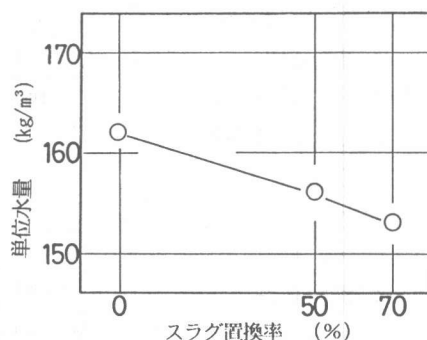


図-1 スラグ置換率と単位水量の関係

ラグ粒子が分散されることによって、スラグの滑らかな表面に起因する潤滑性がより発揮されたものと考えられる。さらに、ナフタリンスルホン酸塩系流動化剤は、セメント成分中の $C_3A$ および $C_4AF$ あるいはそれらの初期水和物に優先的に吸着し、しかもその吸着量は多量であるといわれている<sup>2) 3)</sup>。また、 $C_3A$ と $C_4AF$ の量によって、流動化ペーストの流動性が支配されるという報告<sup>4)</sup>もある。したがって、スラグ置換率が増加し、 $C_3A$ および $C_4AF$ が減少すれば、同じ流動性を得るのに要する流動化剤の添加量は減少するものと考えられる。本研究で用いた高性能AE減水剤のセメント成分への吸着に関する資料はないが、スラグ置換率の増加に伴ってその添加量は減少しており、流動化剤と同様の現象が起っていると推察される。

図-3は所定の空気量を得るのに要したAE助剤の量とスラグ置換率との関係を示す。一般にスラグ置換率が増加すると空気を行くのに要するAE剤量は増加することが知られている。本研究においては、スラグ置換率50%では0%に比べAE助剤量の増加はわずかであるが、スラグ置換率70%では0%の場合の2~4倍のAE助剤量を必要とした。

図-4は各スラグ置換率における最適細骨材率を示したものである。図よりスラグ置換率の増加に伴って最適細骨材率は小さくなる傾向がみられる。これはセメントに比べてスラグの比表面積は大きいので、スラグ置換率の増加に伴って微粉量が多くなり、その分だけ細骨材の量を減じる、つまり細骨材率を小さくすることができると考えられる。また、高性能AE減水剤に比べて流動化剤の場合に最適細骨材率が大きくなったのは、練上り後60分間の空気量の減少が最適細骨材率に影響を及ぼしたものであると考えられる。

### 3.2 スラグ置換率がコンクリートの性質に及ぼす影響

図-5に流動化コンクリートのスランプの経時変化を示す。ベースコンクリートのスランプは練混ぜ後60分間にわずかながら低下するが、スラグ置換率による差は認められない。流動化後のスランプの経時変化は、流動化後60分まではスラグ置換率による差は見られないが、それ以降ではスラグ置換率50%、70%のものが0%のものに比べてスランプロスが大きくな

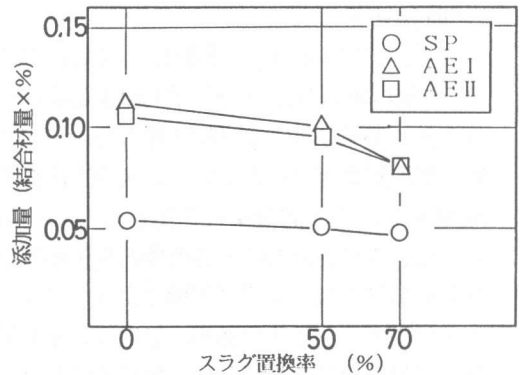


図-2 スラグ置換率と混和剤の添加量の関係

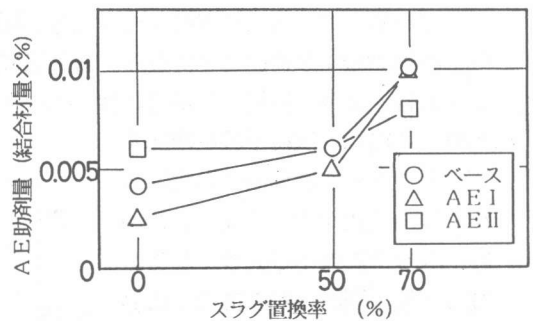


図-3 スラグ置換率とAE助剤量の関係

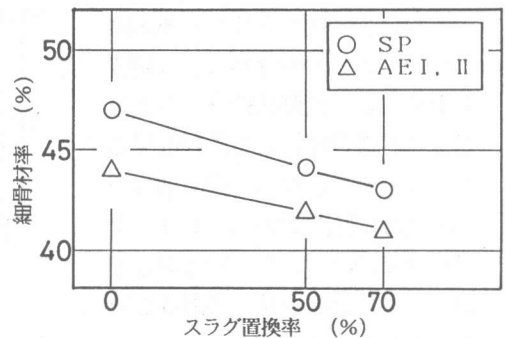


図-4 スラグ置換率と最適細骨材率の関係

る傾向がみられた。

スランブロスが生じる原因としては、セメント粒子の水和反応に伴う化学的凝集およびセメント粒子あるいはスラグ粒子相互の衝突に伴う物理的凝集が考えられている。スラグ置換率が増加すると化学的凝集は当然遅くなる。したがって、スラグ置換による物理的凝集の程度が変わらなければ、スラグ置換によってスランブロスは小さくなる筈である。しかし、本研究の結果では、流動化後 60 分以降においては、スラグ置換を行った方がスランブロスは大きくなっている。スラグ置換を行った方が経時的に物理的凝集が速いことになる。既往研究<sup>5)</sup>によれば、スラグ置換した場合には、ペーストの体積濃度、一次粒子数が増加すること、さらに懸濁液での沈降速度の経時変化が大きくなることから、スラグ置換率が大きくなるに従って粒子間の接触の機会が増加し、粉体粒子が大きな凝集に成長し、このスラグの粉体性状がスランブロスの一因であることを示唆している。しかしながら、本研究においては、流動化後 60 分まではスラグ置換率による影響は見られなかったことから、後添加した場合の流動化スラグ置換コンクリートのスランブロスに関しては、とくに注意を払う必要はないものと思われる。

図-6 に高性能 A E 減水剤を添加したコンクリートのスランブの経時変化を示す。図より、A E I では練上り後 60 分から、A E II では練上り後 30 分から、スラグ置換率の大きいものほどスランブロスが大きくなる傾向を示している。高性能 A E 減水剤 A E I と A E II はそのスランブロス低減機構は異なっている。A E I はスランブロス低減成分の活性持続ポリマーが水酸イオンと加水分解反応を起し、分散性を発揮する作用機構であり、A E II はまず剤に含まれる高分子化合物のうち分子量の大きいものがセメント粒子に吸着して、セメント粒子を分散させ、つぎにセメント水和によって消失する分散成分を比較的低分子量のものが吸着することによって補填していくことの繰返しであると説明されている。このスランブロス低減機構の異なる 2 種類の高性能 A E 減水剤において、両者ともにスラグ置換率の増加に伴ってスランブロスが大きくなった理由としては、流動化剤の項で述べたようにスラグ粒子の物理的凝集が速いこ

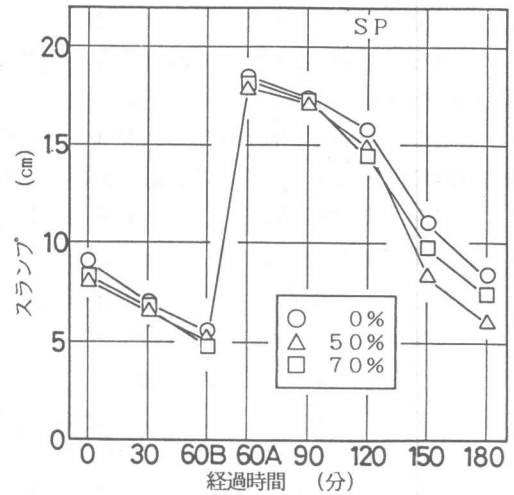


図-5 スランブの経時変化 (SP)

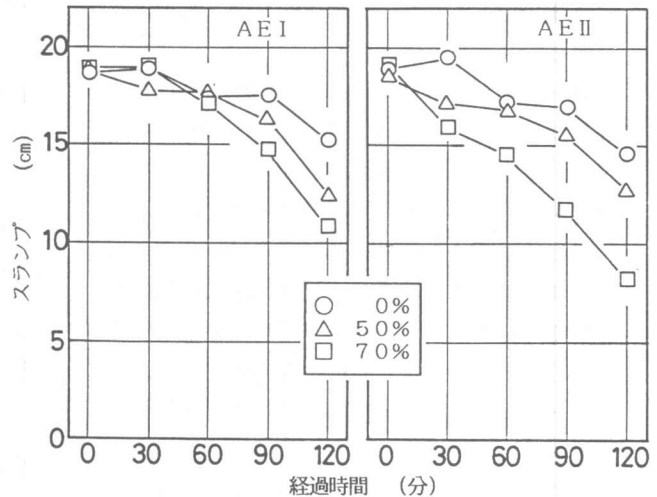


図-6 スランブの経時変化 (A E I, II)

とが考えられるが、その他に高性能AE減水剤のスランプロス低減成分のスラグ粒子への吸着が不十分であった可能性も考えられる。

空気量の経時変化を図-7に示す。流動化剤を後添加した場合、流動化前後における

空気量の損失はスラグ置換率の増加に伴って増加する傾向にあり、スラグ置換率が大きくなる場合には流動化剤にAE助剤を併用する等の対策を考える必要がある。一方、高性能AE減水剤の場合には、スラグ置換率および高性能AE減水剤の種類にかかわらず、練上り直後から60分間の空気量の損失は1%前後となっており、その後の空気量の変化もスラグ置換率の違いによる差はほとんどみられなかった。連行された空気量の安定性はスラグ置換率を増加しても変化しないものと判断できる。

VB値および締固め係数(C.F.)とスラグ置換率との関係を図-8に示す。VB試験および締固め係数試験は流動化剤使用の場合には流動化直後、高性能AE減水剤使用の場合には練上り直後の試料に対して行っている。図より、締固め係数試験においては、混和剤の種類にかかわらずスラグ置換率が増加するに伴って締固め係数が小さくなる傾向にあり、スラグ置換率が増加すると締固め性がやや悪くなることを示しているが、その差はわずかであり、振動下での締固め性を表わすVB値では、スラグ置換率による差はほとんど認められなかった。

図-9はウェットスクリーニングモルタルのレオロジー量とスラグ置換率との関係を示したものである。スラグ置換率の増加に伴ってコンクリートの最適細骨材率は減少し、それに応じてモルタル中の細骨材量も減少するので、降伏値はスラグ置換率の増加に伴って小さくなる傾向を示している。一方、塑

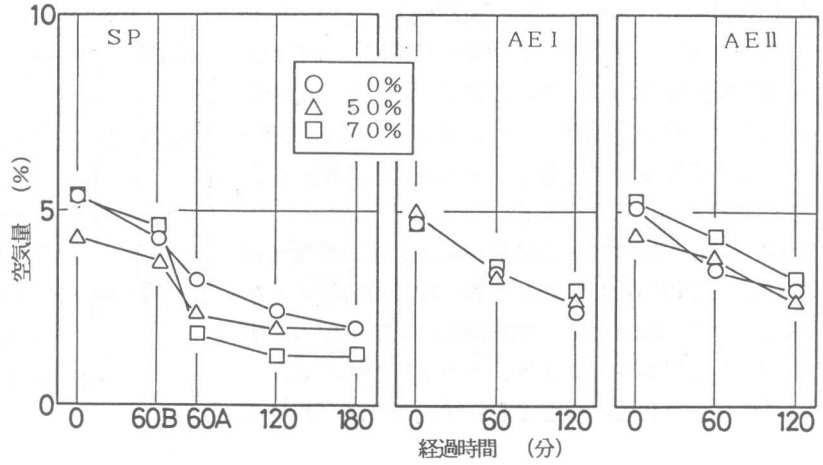


図-7 空気量の経時変化

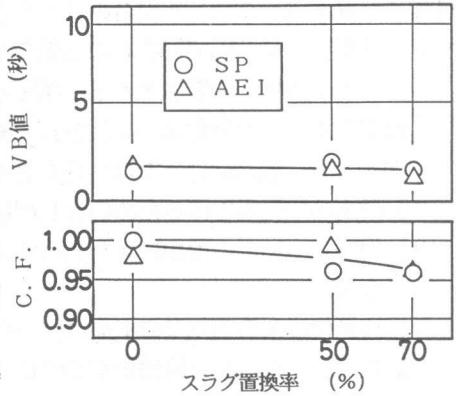


図-8 スラグ置換率が締固め性に及ぼす影響

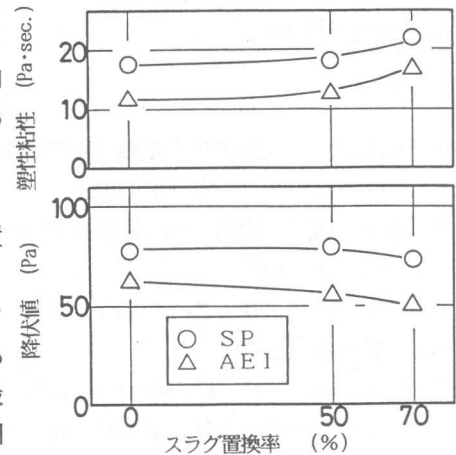


図-9 スラグ置換率とレオロジー量の関係

性粘性はモルタル中の細骨材量が減少しているにもかかわらずスラグ置換率が増加するのに伴って大きくなる傾向を示している。これはセメントに比較してスラグの比表面積が大きく、スラグ置換率が増加するほど微粉量が多くなり、それに応じて粘性も大きくなるものと考えられる。

図-10に分離性試験の結果を示す。図の縦軸は試験によって得られた上層と下層の粗骨材容積の差を採っている。図よりスラグ置換率の増加に伴って粗骨材容積差は減少しており、スラグ置換率が大きくなるに伴って分離が小さくなる傾向がうかがわれる。

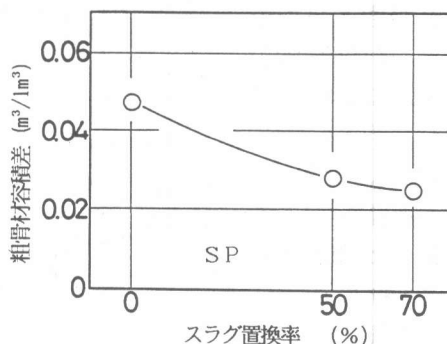


図-10 分離性試験結果

#### 4. まとめ

本研究は、高炉スラグ置換コンクリートの施工性を改善する手段として流動化剤あるいは高性能A E減水剤を添加した場合のコンクリートのワーカビリティを把握することを目的に計画した。本研究の範囲内で得られた結果をとりまとめると以下ようになる。

- 1) スラグ置換率の増加とともに所定のスランブを得るのに要するベースコンクリートの単位水量および流動化剤、高性能A E減水剤の添加量は減少する。また、スラグ置換率の増加とともに最適細骨材率は小さくなる。
- 2) 所定の空気量を得るためのA E剤量は、スラグ置換率の増加とともに増加する。
- 3) 用いた混和剤の種類にかかわらずスラグ置換率が増加するとともにスランブロスは大くなる。
- 4) 流動化による空気量の損失はスラグ置換率が増加すると大きくなる傾向にあり、スラグ置換コンクリートを流動化する際には流動化剤とA E助剤を併用する等の対策が必要である。
- 5) 流動化剤および高性能A E減水剤を添加したコンクリートにおいてスラグ置換率の締めめに及ぼす影響はほとんどない。また、スラグ置換率が増加すると材料分離に対する抵抗性が増加する。

#### 《参考文献》

- 1) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針（案），コンクリート・ライブラリー，No. 63，1988
- 2) 服部，鈴江，岡田：高性能減水剤のセメント粒子への吸着，セメント・コンクリート，pp. 10～19，1981
- 3) 名和，江口：せっこう形態がセメントの流動性に及ぼす影響，セメント技術年報 41，pp. 46～49，1987
- 4) E. Hanna et al：Rheological Behavior of Portland Cement in the Presence of a Superplasticizer，ACI SP-119，pp. 171～188，1989
- 5) 長滝，戸矢，竹内：流動化コンクリートのスランブロス，セメント技術年報 37，pp. 163～80，1983