

論文 スラグ細骨材を用いた高流動コンクリートの自己充てん性能

徳橋一樹^{*1}・庄谷征美^{*2}・阿波 稔^{*3}・月永洋一^{*4}

要旨: 本研究は、細骨材としてフェロニッケルスラグ細骨材および銅スラグ細骨材を用いた、粉体系および増粘剤系の高流動コンクリートの自己充てん性能やフレッシュ時の特性について検討したものである。研究の結果、これらスラグ細骨材を用いた高流動コンクリートは十分な自己充てん性能が得られることを明らかにした。さらに、これらの高流動コンクリートについてレオロジーの観点から考察を行った。

キーワード: 高流動コンクリート、スラグ骨材、自己充てん性、レオロジー

1. まえがき

コンクリート構造物に要求される性能は年々複雑かつ多様化してきており、その要請に対応するためコンクリートの性能を改善し高性能化を図るための研究が盛んに行われている。そのような高性能コンクリートの一つとして、近年、コンクリートの施工性の改善を主目的とした自己充てんタイプの高流動コンクリートが開発され、すでに実構造物に使用されている¹⁾。一方、資源のリサイクル、有効利用の観点から、産業副産物をコンクリート用材料として積極的に利用するための研究が鋭意進められている。この研究の一環として非鉄金属スラグを利用した代替骨材の研究が進展し、フェロニッケルスラグ骨材のJIS改訂とともに²⁾、新たに銅スラグ細骨材が「コンクリート用スラグ骨材」の一部として、1997年8月にJIS A 5011に統合規格化されるに至った²⁾。また、良質なコンクリート用骨材の入手が次第に困難になりつつある情勢を考慮すると、これらのスラグ細骨材などをコンクリート構造物の施工に使用する機会は今後益々増加するものと予想される。

以上のような社会的背景のもと、本研究は、

代替骨材としてフェロニッケルスラグ細骨材および銅スラグ細骨材を用いた、粉体系および増粘剤系の高流動コンクリートの配合特性や自己充てん性能を明らかにすることを目的としたものである。さらに、それらコンクリートのフレッシュ時の性能を、凝結特性やレオロジー特性などの観点から考察を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料

セメントはA社製普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材は、2.5mm粒度に適合するように粒度調整した、比重2.97、吸水率1.37%、F.M.2.48のフェロニッケルスラグ細骨材(FNS細骨材と略す)と比重3.63、吸水率0.31%、F.M.2.20の銅スラグ細骨材(CUS細骨材と略す)を用いた。さらに、比較用および混合用に比重2.65、吸水率1.16%、F.M.2.57の天然砂(NS)を使用した。なお、用いたFNS細骨材は風碎後破碎処理したスラグで表面形状は球形であり、CUS細骨材は水碎スラグで表面は角張ったガラス質の骨材である。粗骨材は、最大寸法20mm、比重2.70、吸水率0.49%、F.M.6.60

*1 太平洋セメント(株) 中部環境マテリアル支店 工修(正会員)

*2 八戸工業大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

*3 八戸工業大学講師 工学部土木工学科 博士(工学)(正会員)

*4 八戸工業大学教授 工学部建築工学科 博士(工学)(正会員)

表-1 実験計画

スラグ 細骨材 混合率 (%)	目標				試験項目
	スランプ フロー (mm)	V型漏斗 流下時間 (sec)	充てん 高さ (mm)	空気量 (%)	
0	700±50 (粉体系)		ボックス 容器		・自己充てん性能の評価 スランプフロー試験、空気量試験 V漏斗流下試験 目視による材料分離抵抗性の判定 経時変化 (60分) 充てん装置を用いた間げき通過性試験
50	600±50 (増粘剤系)	10~20秒	障害 R 1 300以上	4	・フレッシュコンクリートの特性 ブリーディング試験 (JIS A 1123) 凝結試験 (ASTM C 403) レオロジー定数の測定 (二重円筒型回転粘度計)
100					

の石灰岩碎石を使用した。

コンクリートに分離低減および増粘効果を付与する粉体混和材としては、比重 2.70、比表面積 5700cm²/g の石灰石微粉末を用いた。増粘剤は、ポリカルボン酸系セメント分散成分およびポリカルボン酸系特殊分離低減型減水成分を有する 1 液系増粘剤 (VA-1)、水溶性セルロースエーテルを成分とする増粘剤 (VA-2) の 2 種類を用いた。また、高流動性およびフレッシュ性状の保持性能を付与する目的で、ポリカルボン酸系の 2 種類の高性能 AE 減水剤 (SP-1, SP-2) を使用した。さらに、空気連行の助剤として、天然樹脂を主成分とする 2 種類の AE 剤 (AE-1, AE-2) を用いた。

2.2 コンクリートの配合条件と目標値

実験に用いたコンクリートは、粉体系高流動コンクリート (W/C 0.55) と増粘剤系高流動コンクリート (W/C 0.40) の 2 種類である。コンクリートの細骨材容積に対するスラグ骨材の混合率は、0%、50% および 100% である (表-1)。なお、増粘剤系高流動コンクリートについては FNS 細骨材を用いたケースのみ行った。スランプフローは 700±50mm (粉体系)、600±50mm (増粘剤系)、V 型漏斗流下時間は 10~20 秒程度、空気量は 4% を目標とした。

2.3 自己充てん性能の評価試験

フレッシュコンクリートの自己充てん性能は、スランプフロー試験、漏斗を用いた流下試験 (吐

出口 65×75mm の V 漏斗)、空気量、充てん装置を用いた間げき通過性試験 (ボックス型容器) により評価した。これらの試験は、いずれも土木学会規準 (案)³⁾に従って行った。なお、スランプフロー値、V 漏斗流下時間および空気量については練上り 30 分後と 60 分後においても測定し、フレッシュ性状の保持性 (静置状態における経時変化) を調べた。

2.4 フレッシュコンクリートの特性試験

ブリーディング試験は JIS A 1123 の方法に準じて、内径 250mm、内高 285 mm の円筒容器を用い 20℃ の恒温室中で行った。

凝結硬化速度試験は ASTM C403 の方法によって行った。練上がり直後のコンクリートを 5 mm ふるいでウエットスクリーニングしたモルタルを、最大横寸法 150 mm、深さ 150 mm 以上の角型枠に詰め、水分の蒸発を防ぐ覆いを被せ 20℃ に保たれた室内に静置し試験を行った。そして、貫入針をモルタル中に一定速度で鉛直下方に 25mm の深さまで貫入させ、そのときの所要の力 (貫入抵抗値) と練混ぜからの経過時間を記録し、始発 500psi および終結 4000psi ($1\text{psi}=6.86\times 10^{-3}\text{N/mm}^2$) に達するまで試験を行った。

また、二重円筒型回転粘度型を用いてコンクリートの降伏値と塑性粘度を測定した。練上り直後のコンクリートを円筒容器内に詰め、内円筒の回転速度を 2rpm 毎に上昇および降下さ

する傾向を示した。これは、FNS 細骨材の粒子形状が球形に近いためであると考えられる。一方、CUS 細骨材の場合は、スラグ混合率が 50% 増加すると、単位水量が 2~3 kg/m³ 増加する傾向となった。これは、0.06mm 以下の微粒細骨材が多く含まれている CUS 細骨材（本研究で用いたものは、8% であった）を用いたために、細骨材中の微粒分が粉体と同様の挙動を示したためであると考えられる。

増粘剤系高流動コンクリートの場合にも、使用した増粘剤が同一である Control と FNS-50 とを比較すると、FNS 細骨材の増加にともない単位水量が減少する傾向が見られた。なお、増粘剤系においてスラグ混合率を 100% とした場合には、セメント分散成分と分離低減型減水成分の 2 成分を有する増粘剤 VA-1 では十分な増粘効果が得られず、分離気味であったため、別な増粘剤 VA-2 を使用した。そのため、増粘剤の使用量が大きく異なる配合となった。

3.2 自己充てん性能の評価

表-3 は、フレッシュコンクリートの自己充てん性能評価試験の結果を示したものである。表中の間げき通過性試験の充てん高さは、障害 R1 を用いて試験したものである。この表に見られるように、練上り直後におけるボックス充てん高さは、いずれの配合条件の場合にも 300mm 以上が得られており、土木学会高流動コンクリート施工指針³⁾ に示されている自己充てん性のランクと各種評価試験値の目安より、全ての配合においてランク 1 に相当することが認められた。

また、フレッシュ性状の経時変化特性は、CUS 細骨材を用いた場合にスランプフロー値および V 漏斗流下時間とともに空気量が減少しているにも関わらず良好な結果を示した。特に、CUS 細骨材を 100% 用いたケースにおいて極めてロスが小さくなる傾向が見られた。一方で、FNS 細骨材を用いた場合には、増粘剤系の高流動コンクリートとすることによって経時変化のロスが比較的改善された。これは、使用した混和剤

表-4 最終ブリーディング量および凝結時間

配合名	ブリーディング量 (m ³ /m ²)	始結時間 (hr-min)	終結時間 (hr-min)
P Control	0.0002	5-43	8-12
P FNS-50	0.0002	4-11	7-18
P FNS-100	0.0003	4-47	8-14
P CUS-50	0.0002	6-12	9-16
P CUS-100	0.0002	7-16	9-45
V Control	0.0030	5-42	9-41
V FNS-50	0.0029	4-18	8-45
V FNS-100	0.0013	11-13	13-36

の種類や使用量などに起因するものと考えられる。

3.3 フレッシュコンクリートの特性

（1）ブリーディング性状

粉体系高流動コンクリートでは、石灰石微粉末がブリーディング量を抑制し、各スラグ混合率の最終ブリーディング量は 0.0003 (m³/m²) 以下と非常に少ない結果を示したことから、本実験の範囲ではスラグ細骨材コンクリートであってもブリーディングを生じないものと考えて良いと判断される（表-4）。

増粘剤系高流動コンクリートの場合において Control および FNS-50 では同程度のブリーディングを生じ、200 分以内でブリーディングは終了しているが、FNS-100 では約 600 分と長時間のブリーディングが観察され、両者で明らかに傾向が異なる結果が得られた。これは、Control および FNS-50 で使用された増粘剤と、FNS-100 で用いられた増粘剤の種類が異なるため、その作用機構の違いによるものと考えられる。

（2）凝結性状

表-4 に示されるように、粉体系高流動コンクリートにおいて FNS 細骨材を用いた場合には、凝結速度は一般に速くなる傾向を示した。これは単位水量の減少によるものと考えられる。また、CUS 細骨材を用いた場合には、その混合率の増加にともない凝結速度は遅れる傾向を示した。この原因は必ずしも確定されてないが、銅スラグ中の亜鉛などの酸化物によるセメント鉱物の水和反応抑制効果などが原因として考えられている⁴⁾。これより CUS 細骨材を用いた場合、60 分後のフレッシュ保持性が良好な値

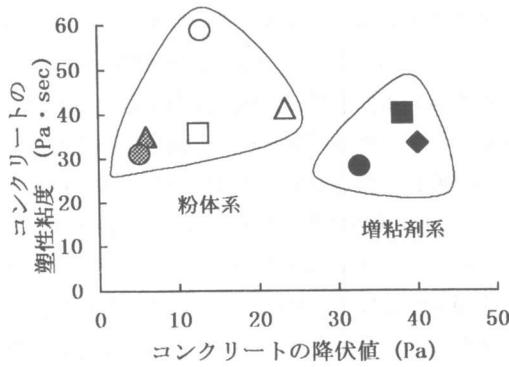


図-1 降伏値と塑性粘度との関係

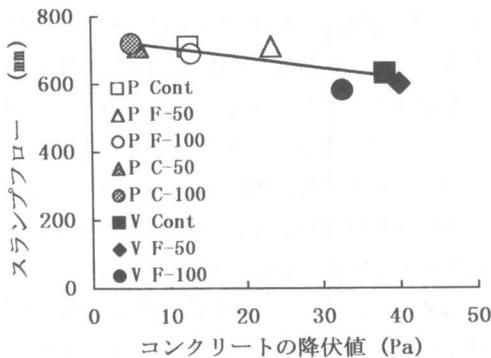


図-2 降伏値とスランプフローとの関係

を示す主な理由として、凝結速度が遅いためにこわばり難くなるためとの推察が可能である。

また、増粘剤系高流動コンクリートにおいて、使用された増粘剤が同一である Control と FNS-50 とを比較すると、粉体系と同様に FNS 細骨材の增加にともない凝結速度が速くなる傾向が見られた。

(3) レオロジー特性

図-1 は、コンクリートの降伏値と塑性粘度との関係を示したものである。これらの結果より、粉体系、増粘剤系の 2 つのグループに分かれ、同程度の塑性粘度でありながらも、粉体系では増粘剤系と比べて全般に降伏値が小さくなっているのが分かる。これは目標スランプフローが前者が 700 mm、後者で 600 mm と異なったために影響が現れたものと考えられる。また、CUS 細骨材を用いた場合は、FNS 細骨材を用いた場合と比べ塑性粘度および降伏値と

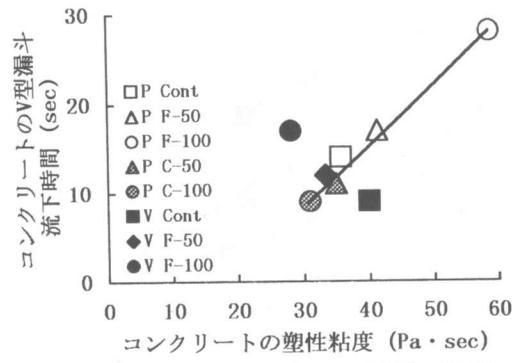


図-3 塑性粘度とV漏斗流下時間との関係

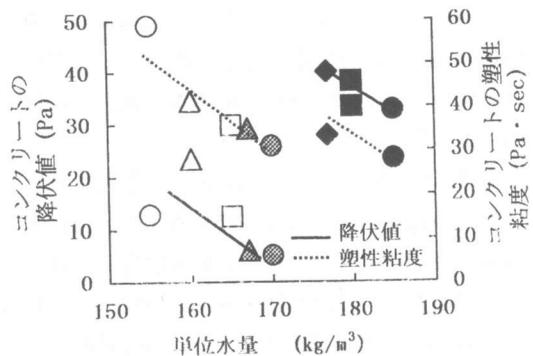


図-4 単位水量と降伏値および塑性粘度との関係

もに低下する傾向を示した。

図-2 は、コンクリートの降伏値とスランプフローとの関係を示したものである。これらの結果より、スランプフロー値の低下によって降伏値は増加する傾向を示し、従来からの報告⁵⁾と一致する結果となった。

図-3 は、コンクリートの塑性粘度と V 漏斗流下時間との関係を示したものである。この図に見られるように、塑性粘度が増加すると、V 漏斗流下時間は遅くなる傾向を示した。また、FNS 細骨材の混合率が増加すると、塑性粘度が増加する傾向が見られた。これは FNS 細骨材を用いたコンクリートの V 漏斗流下時間が、その混合率の増加にともない増大したことと関連性があるものと考えられる。

図-4 は、単位水量とコンクリートの降伏値および塑性粘度との関係を示したものである。

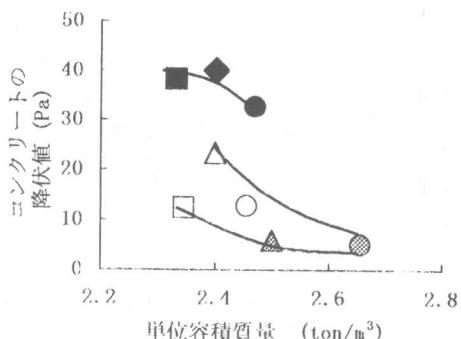


図-5 単位容積質量と降伏値との関係

この図に見られるように、見かけ上単位水量の増加にともない粉体系と増粘剤系のグループ毎に降伏値および塑性粘度は直線的に減少する傾向を示した。

図-5は、コンクリートの単位容積質量と降伏値との関係を示したものである。この図に示されるように、コンクリートの単位容積質量の増加にともない降伏値は減少する傾向が見られた。これは、FNS 細骨材や CUS 細骨材の増加によりコンクリートの単位容積質量が増大したするに、自重によるせん断応力が増加し、粒子の構造破壊が起きやすくなつたためではないかと考えられる。

これらの結果より、粉体系および増粘剤系コンクリートは、高性能 AE 減水剤添加率、増粘剤添加率、空気量、水粉体容積比 (W/P)、単位粗骨材絶対容積がほぼ一定でありながらも、降伏値および塑性粘度に差が生じたのは、コンクリートの単位水量や単位容積質量の影響が主要因ではないかと考えられる。

4. まとめ

フェロニッケルスラグ細骨材および銅スラグ細骨材を用いた粉体系および増粘剤系高流動コンクリートの配合特性、自己充てん性能およびフレッシュコンクリートの特性について検討を行った。本実験の範囲内で以下のようなことが言える。

1. FNS 細骨材を用いた高流動コンクリート

の単位水量は、その混合率の増加にともない減少傾向を示すこと、一方で CUS 細骨材を用いた場合の単位水量は、増加傾向を示すことが分かった。これは、それぞれの細骨材の粒子形状や粒度に起因したものではないかと考えられる。

2. FNS 細骨材および CUS 細骨材を用いた粉体系および増粘剤系高流動コンクリートの間げき通過性試験（障害 R1）を行った。その結果、

スラグ細骨材の種類やその混合率によらず、全ての配合において 300mm 以上の充てん高さを示し、十分な自己充てん性が認められた。

3. 凝結速度は、FNS 細骨材混合率の増加にともない速くなること、逆に、CUS 細骨材混合率の増加にともない遅くなることが分かった。

4. 銅スラグ細骨材を用いた場合は、フェロニッケルスラグ細骨材を用いた場合と比べレオロジー定数の塑性粘度 η_{pl} および降伏値 τ_a が低下する傾向を示した。また、粉体系および増粘剤系コンクリートの高性能 AE 減水剤添加率、増粘剤添加率、空気量、水粉体容積比 (W/P)、単位粗骨材絶対容積がほぼ一定でありながらも、降伏値および塑性粘度が変化するのは、コンクリートの単位水量や単位容積質量の影響が主要因ではないかと考えられる。

参考文献

- 岡村 甫・前川宏一・小澤一雅：ハイパフオーマンスコンクリート，技報堂出版，1993
- 日本工業標準協会 審議：コンクリート用スラグ骨材 JIS A 5011（日本規格協会 発行），1997年8月20日 制定
- 土木学会：高流動コンクリート施工指針，1998
- (社) 日本鉱業協会：銅スラグコンクリート研究委員会 委員会資料「銅スラグ砂コンクリートの凝結について」，1995
- 大久保正弘・田中洋一・名和豊春：粉体系および増粘剤系高流動コンクリートのフレッシュ性状の比較実験、土木学会、高流動コンクリートシンポジウム論文集, pp.71-76, 1996