

論文 使用材料の粒度分布が高流動コンクリートのフレッシュ時の品質に及ぼす影響

相良健一^{*1}・魚本健人^{*2}

要旨：高炉スラグ微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートにおいて、様々な要因がフレッシュ時の品質に及ぼす影響を把握し、その理由を粉体材料の粒度分布の測定から比表面積、全表面積、比表面積球相当径などを算出し考察を行った。その結果、高流動コンクリートのフレッシュ時に生じる自由水超過による材料分離、自由水不足による流动性低下の理由を粉体粒子に拘束される水量との関連で説明することが可能であった。またニューラルネットワークおよび感度解析を用い粉体粒子の推奨粒度分布の提案を行った。

キーワード：粒度分布、比表面積、表面積、拘束水、推奨粒度分布

1. はじめに

高流動コンクリートは、高流動性、高材料分離抵抗性という性質を有し締固め作業を行うことなく型枠の隅々まで自己充填することが要求されるものである。これらの要求性能を全て満足するためには、使用材料の選定及び配合設計を行うことが重要であるが、高流動コンクリートは普通コンクリートと比較して構成材料の種類が多く、フレッシュ時の性質がその使用材料の種類や特性により大きく異なり所要の品質を確保できない場合がある。

本研究では、混和材として高炉スラグ微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートにおいて、高炉スラグ微粉末、細骨材、粗骨材、高性能AE減水剤などの各構成材料が変形性や材料分離抵抗性などのフレッシュ時の品質に及ぼす影響の把握を実験により行った。またフレッシュコンクリートは水と粒子の集合体という考えのもと使用材料の粒度分布に着目した考察を行い、粉体粒子の推奨粒度分布の提案を試みた。

2. 使用材料特性

実験に用いた高流動コンクリート構成材料及びその物性を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、混和材として高炉スラグ微粉末(4種類)を用いた。細骨材は2種類用い、それらの混合割合の変化、粗骨材は最大寸法を20mmとし、G小(5~13mm)、G大(13~20mm)の混合割合の変化により粒度分布を調整し用いた。

表-1 使用材料及び物性

材 料	記 号	材 料 物 性
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 3150(kg/m ³)、比表面積 3260(cm ² /g)
混和材	BS40 BS60 BS80 BS100	高炉スラグ微粉末、密度 2900(kg/m ³)、比表面積 4110(cm ² /g) 高炉スラグ微粉末、密度 2900(kg/m ³)、比表面積 5810(cm ² /g) 高炉スラグ微粉末、密度 2900(kg/m ³)、比表面積 7960(cm ² /g) 高炉スラグ微粉末、密度 2900(kg/m ³)、比表面積 9800(cm ² /g)
細骨材	S1 S2	富士川産川砂、密度 2630(kg/m ³)、吸水率 1.89%、実積率 65.8% 富士川産川砂、密度 2660(kg/m ³)、吸水率 1.47%、実積率 65.5%
粗骨材	G小 G大	両神産碎石 5~13mm、密度 2700(kg/m ³)、実積率 57.1% 両神産碎石 13~20mm、密度 2700(kg/m ³)、実積率 58.2%
混和剤	SP AE	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系) AE助剤(ロジン系界面活性剤)

*1 東京大学大学院、工学系研究科社会基盤工学専攻（正会員）

*2 東京大学教授、生産技術研究所、工博（正会員）

3. 実験概要および実験結果

まず練混ぜ時間、水粉体比、細骨材容積比、細骨材率などを変化させることで表-2に示す基準配合を決定した。この基準配合に対し、粉体(C+BS)、高性能AE減水剤を以下の各項目別に示す変化項目、水準で変化させ、フレッシュ時の品質に及ぼす影響を表-3に示す性能評価試験を用いて評価を行った。なおその際の目標値は表-4に示すように設定した。

3.1 粉体の粒度分布変化時の影響

粉体の粒度分布変化時の影響を把握するために、表-5に示すようにスラグ比表面積、スラグ置換率、粉体量を4~6水準変化させた。

3.1.1 スラグ比表面積の影響

今回用いた高炉スラグ微粉末(4種類)をレーザー回折式粒度分布測定装置により測定した粒度分布を図-1、スラグ比表面積変化時の実験結果を図-2~4に示す。スランプフローはスラグ比表面積約8000(cm²/g)、V漏斗流下時間は約7000(sec)、ボックス充填高さは約7000(cm²/g)を境に傾向が変わり品質が悪化していることが分かる。この理由を説明するために粒度分布より各粒径の個数を式(1)より、またその得られた個数より各スラグの比表面積(以後実測比表面積)、全表面積、比表面積球相当径[1]を算出した。なお式(1)の粒度分布とはレーザー回折式粒度分布測定装置において測定された体積分布であり、比表面積球相当径とは同じ比表面積の球の直径である。

表-2 基準配合

W/P (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					添加率(P×%)	
		W	C	BS	S	G		
35	55	175	150	350	863	725	0.8	0.4

表-3 性能評価試験及び測定項目

試験名	測定項目
空気量	空気量(圧力法)
スランプフロー	フロー幅・50cm到達時間・フロー停止時間
V漏斗流下試験	流下時間(練上がり直後・5分静置後)
ボックス試験	充填高さ

表-4 各測定項目目標値

試験名	目標値
空気量	4.0~7.0(%)
スランプフロー	65±5(cm)
50cm到達時間	5(sec)以内
フロー停止時間	15~30(sec)
V漏斗流下試験	直後・5分静置後共に5~15(sec)以内
ボックス試験	30(cm)以上

表-5 粉体変化項目及び変化水準

変化項目	水準	変化させた材料
スラグ比表面積(cm ² /g)	4000~6000~8000~10000	BS40,60,80,100
スラグ置換率(%)	30~40~50~60~70~80	C,BS60,S
粉体量(kg/m ³)	400~450~500~550~600	C,BS

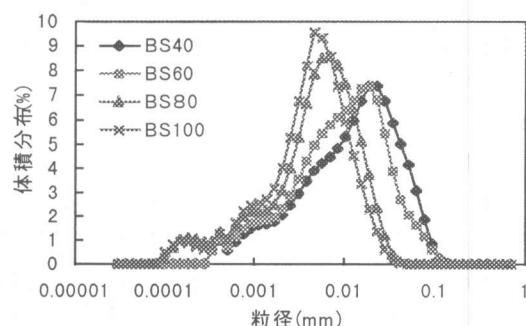


図-1 スラグ比表面積別の粒度分布

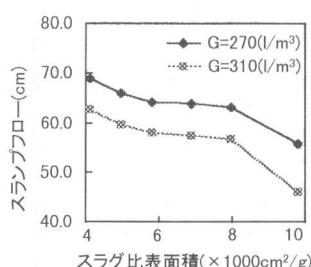


図-2 比表面積とスランプフローの関係

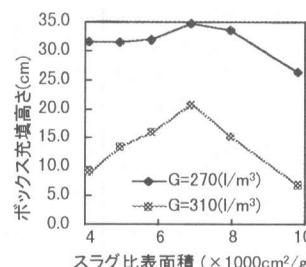


図-3 比表面積とボックス充填高さの関係

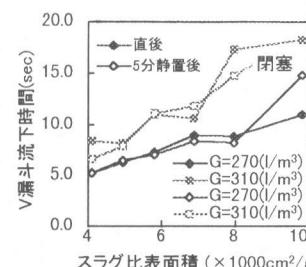


図-4 比表面積とV漏斗流下時間の関係

$$(各粒径の個数(個) = (全体積(m³) \times 粒度分布(%) / 100) / 1 個当たりの体積(m³/個)) \quad (1)$$

表-6 にスラグのプレーン比表面積と実測比表面積および比表面積球相当径を示す。プレーン比表面積約 7000(cm²/g)において実測比表面積との差が急激に増加している。同様に比表面積球相当径においてもプレーン比表面積約 7000(cm²/g)を境に急激に粒径が小さくなっている。粒子の表面に一定の厚さで水が拘束されると考えると、比表面積の増加つまり表面積の増加により粒子表面の拘束水が急激に増加し、自由水の減少ひいては流動性の低下、充填性の低下をきたしたものと考えられる。

図-5 に比表面積と粒子間拘束水の比の関係を示す。通常スラグ出荷時に物性を表す指標として表示されているプレーン比表面積から拘束水を幾何学的に算出した場合、理論的にはプレーン比表面積の増加にともない拘束水が徐々に増加する。しかし、実際に粒度分布測定より実測した場合、プレーン比表面積約 6000(cm²/g)で急激に増加し、それ以上の比表面積では理論値と実測値に大きな差が生じている。つまり、プレーン比表面積という実際の比表面積とは必ずしも一致しない比較値を用いて拘束水を算出する場合、実際に比べ過小評価してしまうおそれがあり、粉体に関しては、粒子の正確な表面積を求めることが重要である。

3.1.2 スラグ置換率の影響

図-6、7 にセメントをスラグ(BS60)に置換した場合の実験結果を示す。スランプフローは置換率が小さい場合(50%以下)、目標値 60cm をのに対し、置換率 60%以上となると十分な流動性が得られた。ボックス充填高さに関しては、粗骨材量が 270(l/m³) の場合は全て 30cm 以上と高い充填性を示したのに対し、粗骨材量が 310(l/m³)の場合、置換率の増大に伴い充填高さは大きくなるものの目標値 30cm には至らなかった。水と粒子の関係を考えるために実際に粒度分布測定後、実測比表面積などを算出した場合、スラグ粒子の方がセメント粒子よりも小さいため、置換率が増大するに伴い、平均粒径は小さく、比表面積、表面積は増大した。したがって先程の考えでいくと、置換率の増大に伴い粒子表面に拘束される水量が大きくなり、流動性の低下をきたすことになるが、図-6、7 ではその傾向は伺えていない。セメント粒子とスラグ粒子では拘束する水量及び同一の流動性を得るための水量が異なる[2]ことを考慮すれば、スラグ粒子はセメント粒子に比べ拘束する水量が多く残りの自由水が少なくなるが、同一の流動性を得るための単位水量が少なくてすむため流動性が向上したと

表-6 プレーンおよび実測比表面積

比表面積(cm²/g)	Dps*(m)
プレーン	実測
4110	4848
4960	5166
5810	5485
6885	11352
7960	13210
8880	13489
9800	13768

*比表面積球相当径

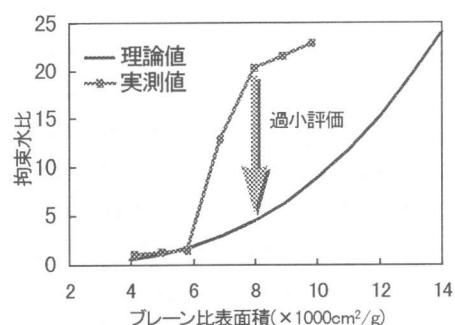


図-5 比表面積と粒子間拘束水の比

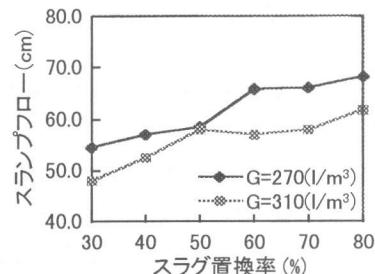


図-6 スラグ置換率とスランプフローの関係

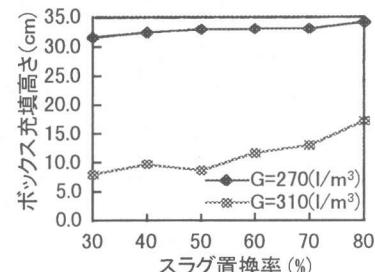


図-7 スラグ置換率とボックス充填高さの関係

考えられる。つまり置換率が小さい場合、極端に言えばセメント粒子のみの場合は全表面積が小さく拘束する水が少なく、残りの自由水が多くとも、その自由水が流動性を増大させるほど十分ではないため流動性が向上しないと考えられる。

3.1.3 粉体量の影響

モルタル体積を一定にして粉体量を変化させる場合、粉体量の増減により水ないし細骨材での補正が必要となる。この場合、フレッシュ時の品質に違いが生じても粉体量の影響か補正した材料による影響か区別が付かない恐れが生じてしまう。そこで本実験では、基準配合に対し粉体量のみを表-5に示す水準で変化させその影響を調べた。

図-8、9にV漏斗流下試験とボックス試験の結果を示す。V漏斗流下時間は練混ぜ直後、5分静置後とともに粉体量の増加するうち表面積増加により自由水が減少し長くなっている。ボックス充填高さも粉体量の増加に伴い高さが上がり粉体量が約500(kg/m^3)を超えると30cm以上の高い充填性を示している。図-3において比表面積が増加すると粒子表面の拘束水が増加しボックス充填高さの低下が見られたのにに対し、粉体量変化時は600(kg/m^3)まで増加した場合においても高い充填性を示している。そこで各粉体量別の全表面積を算出し、図-10に示すように3.1.1で表面積過多により充填性の低下をきたしたスラグ比表面積変化時の全粉体量表面積と比較してみると、粉体量600(kg/m^3)においてもその全表面積がBS60を用いた場合の表面積程度であり、粒子表面に拘束される水が少ないと考えられる。

3.2 高性能AE減水剤添加率の影響

次に高性能AE減水剤添加率の変化がフレッシュ時の品質に及ぼす影響の把握を行った。高性能AE減水剤添加率を粉体量に対して、0.6, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2(%)と変化させ表-3の試験を実施した。また練混ぜ後の粒度分布の変化

を見るために練混ぜ直後のコンクリートを90 μm ふるいによりウエットスクリーニングし、直ちにレーザー回折式粒度分布測定装置を用い測定を行った。

図-11、12にスランプフロー試験及びボックス試験の結果を示す。スランプフローは高性能AE減水剤添加率の増大に伴い大きくなる傾向を示したが、添加率が1%を超えると分離気味となり

目標値を達成できなかった。ボックス充填高さは高性能AE減水剤添加率の増大に対し、上に凸の傾向を示し、添加率0.8%時の30cm以上となった。

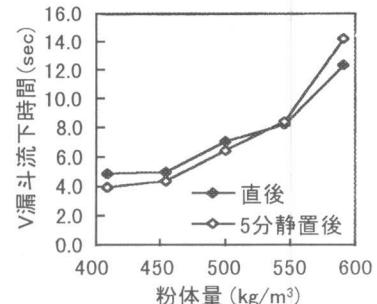


図-8 粉体量とV漏斗流下時間の関係

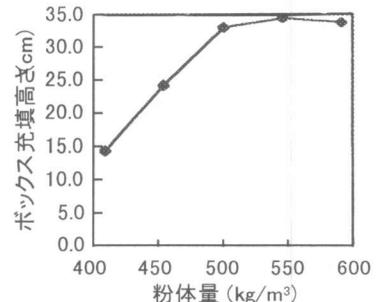


図-9 粉体量とボックス充填高さの関係

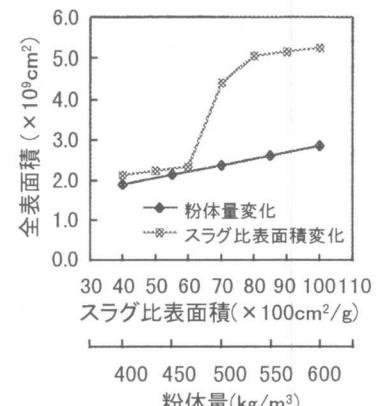


図-10 スラグ比表面積及び粉体量変化時の全表面積の比較

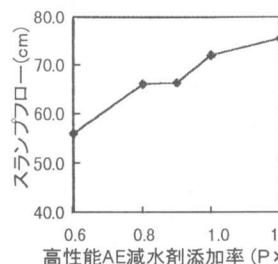


図-11 高性能AE減水剤添加率とスランプフローの関係

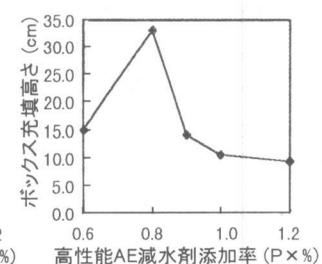


図-12 高性能AE減水剤添加率とボックス充填高さの関係

これらの結果より高性能 AE 減水剤添加率が大きすぎる場合、材料分離を起こし目標値を達成できなかったことが考えられるが、その理由を練混ぜ後の粒度分布の点から考察を行った。図-13は練混ぜ直後の $90 \mu\text{m}$ 以下の粒度分布測定結果である。

この粒度分布結果より、高性能 AE 減水剤添加率の増大に伴い粒径①(約 $0.0025\sim 0.0069\text{mm}$)の粒子量(分布)割合が増加し、粒径②(約 $0.0069\sim 0.023\text{mm}$)の粒子量割合が減少していることが伺える。この時の平均粒径を算出したものが図-14であるが、実際、高性能 AE 減水剤添加率の増大に伴い粒径が小さくなっている。練混ぜ後のセメント(スラグ)粒子の粒度分布測定結果から実測比表面積を算出後、セメント(スラグ)粒子の凝集体が球形であると仮定し、 $\phi/\text{実測比表面積(球形の場合 } \phi=6)$ により凝集体粒径(D_f)の算出を行った。表-7は、添加率別の凝集割合を示したものであり、添加率 0.6% を 1 とした時に比べ添加率の増大に伴い凝集割合が減少し、粒子が分散しているのがわかる。高性能 AE 減水剤添加率変化によるフレッシュ時の品質の変化は、添加率が小さい場合は凝集した粒子を分散させる減水剤の効果が不十分な状態であり、流動性を支配する自由水量が不足し流動性が不十分であるが、添加率が過度に大きい場合は粒子分散により自由水量の過度の増加により材料分離につながったと考えられる。

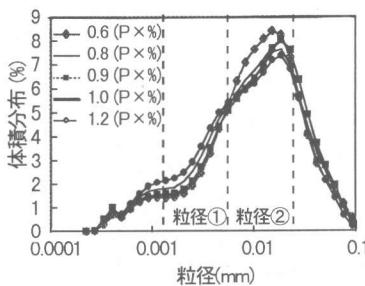


図-13 高性能AE減水剤添加率変化時の粒度分布($90 \mu\text{m}$ 以下)

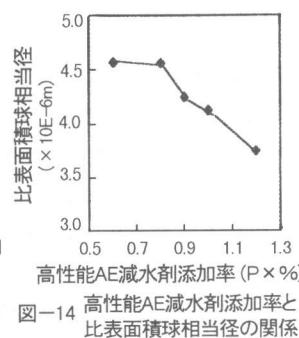


図-14 高性能AE減水剤添加率と比表面積相当径の関係

表-7 添加率変化時の凝集割合

SP (P x %)	比表面積 (m^2/m^3)	D_f (m)	凝集 割合
0.6	1.31E+06	4.57E-06	1.00
0.8	1.32E+06	4.55E-06	0.99
0.9	1.41E+06	4.24E-06	0.80
1.0	1.46E+06	4.12E-06	0.74
1.2	1.60E+06	3.75E-06	0.55

表-8 粒径分類および各粒径の構成割合

4. 推奨粒度分布

前述のように粉体粒子は水との関係を考えた場合、フレッシュ時の品質に及ぼす影響が大きい。そこで自己充填性を有する高流動コンクリートを製造するにあたり適用可能な粉体の粒度分布の提案を試みた。

粉体の推奨粒度分布を求める手法としてニューラルネットワークおよび感度解析³⁾を用いた。まず、高流動コンクリートを表-8に示すように水と様々な粒径の粒子、合計 8 つに分類した。次に、入力因子として水および各粒径の使用量、出力因子としてボックス充填高さを選出し、3 層階層型のネットワークモデル

分類	粒径 (mm)	セメント (%)	スラグ (%)	細骨材 (%)	粗骨材 (%)	計 (%)	全体に占める割合* (%)
粒径1	0.000~0.016	22.44	77.52	0.03	0.00	100	14.72
粒径2	0.016~0.032	36.94	62.58	0.48	0.00	100	6.30
粒径3	0.032~0.064	50.77	44.70	4.54	0.00	100	2.40
粒径4	0.064~0.09	28.16	28.03	43.81	0.00	100	1.04
粒径5	0.090~0.15	3.02	3.08	93.90	0.00	100	1.35
粒径6	0.15~5	0.00	0.00	100.00	0.00	100	39.47
粒径7	5~20	0.00	0.00	0.00	100.00	100	34.72

* 各粒径の質量が全質量に占める割合

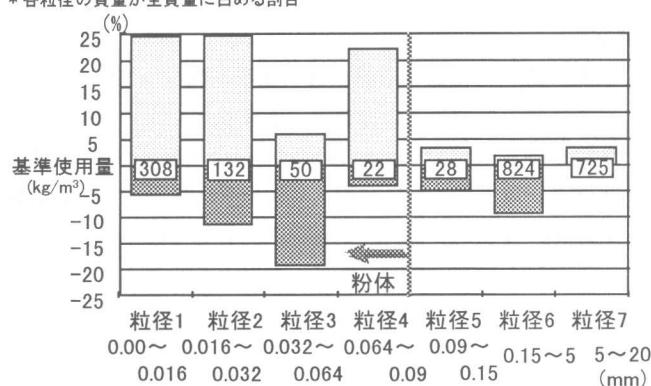


図-15 ボックス充填高さ30cmを満足する各粒径の使用量範囲

を用い解析を行った。この解析結果をもとに、図-15に示すようにボックス充填高さ30cmを満足する各粒径別の使用量の算出を行った。この場合に、粒径 $90 \mu\text{m}$ 以下を粉体と考え、粒度分布を示したものが図-16である。つまり粉体の粒度分布がこの範囲に収まっている場合に自己充填性を有する高流動コンクリートの製造が可能である。なお点線は基準配合時の粒度分布である。

5.まとめ

本研究は高流動コンクリートのフレッシュ時の品質が、水と様々な粒径の粒子によって影響を受けるという考え方のもと、その粒度分布、比表面積及び表面積の算出により考察を行ったが、以下に得られた知見をまとめると。

- 1) 現在、高炉スラグ微粉末はプレーン比表面積により種類分けされ管理されているが、粒度分布より算出した実測比表面積と比較した場合、プレーン比表面積約 $6000(\text{cm}^2/\text{g})$ を超えると両者に大きな違いが生じる。また、フレッシュ時の品質の低下が実測比表面積の変化と関係が深いことからプレーン比表面積ではなく実測比表面積で評価する必要がある。
- 2) 粉体量の増加は粘性を高め約 $500(\text{kg}/\text{m}^3)$ を超えると十分なフレッシュ時の品質が確保でき、 $600(\text{kg}/\text{m}^3)$ に至っても全表面積は BS80 や BS100 使用時に比べ小さく目標値を逸脱するほど過度の粘性増加には至らない。
- 3) 高性能 AE 減水剤添加率変化時のコンクリートを練混ぜ後、粒度分布の測定から凝集の割合を算出することでその分散程度が算出できる。
- 4) ニューラルネットワークを用いた解析より、ボックス充填高さ 30cm を満足する粉体粒子の推奨粒度分布の提案を行った。

[謝辞]

本研究の実施に際し、芝浦工業大学卒論生の横瀬浩一君ならびに東京大学生産技術研究所の加藤佳孝助手、千葉工業大学卒論生の荒川和宣君をはじめ関係者各位に多大なる協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- [1] 三輪茂雄：粉体工学通論、日刊工業新聞社、1981
- [2] 江東、藤原忠司、小山田哲也：各種粉体を用いたペーストおよびモルタルの流動特性、土木学会、高流動コンクリートシンポジウム論文報告集、1996
- [3] 大矢孝、魚本健人、堤知明：ニューラルネットワークを用いたコンクリート製造管理システムに関する研究、土木学会論文集、No. 514/V-27、1995.5

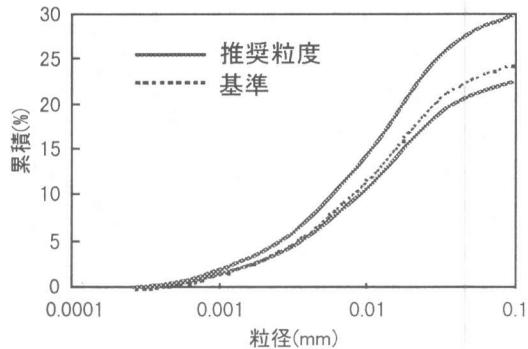


図-16 粉体($90 \mu\text{m}$ 以下)の推奨粒度分布曲線