

論文

[1018] 高流動コンクリートの流動性評価に関する研究

吉野 公*1・西林新蔵*2・井上正一*3・権 赫文*4

1. はじめに

コンクリート構造物の大型化や高層化が進む中、コンクリート作業員の人員不足が顕在化し、コンクリート工事の省力化や合理化が求められるとともに、作業者の熟練度や施工法に左右されない、高品質でかつ高耐久性のコンクリートの開発が強く望まれている。

このような背景から、フレッシュコンクリートの施工性能改善を目的として、高流動性と材料分離抵抗性を合わせ持つ締固め不要コンクリートあるいは高流動コンクリートの研究が活発に行われるようになった。この種のコンクリートは複数の混和材を混和したり、増粘剤を添加するなど、流動性と材料分離抵抗性に対する様々な工夫がなされている。しかし、適正な配合設計方法は確立されておらず、また、これらのコンクリートは、従来のコンクリートに比べフレッシュ時の性質が異なるため、スランプやスランプフローだけで流動特性を評価するには不十分であり、流動性と材料分離抵抗性を評価するための測定方法[1],[2]が種々提案されているが、いまだに確立された方法はない。

本研究は、使用材料あるいは配合が高流動コンクリートのワーカビリティに及ぼす影響を把握することを目的とし、まず、モルタルのレオロジー定数、粗骨材量等が高流動コンクリートの鉄筋間の通過性に及ぼす影響を検討した。次に、高流動コンクリートの混和材の一種として用いられている石灰石微粉が高流動コンクリートのワーカビリティに及ぼす影響を粉末度の異なる3種類の石灰石微粉を用いて実験的に検討した。

表-1 粉体の物理的性質

粉体の種類	比重	粉末度 (cm ² /g)
普通セメント	3.15	3220
高炉スラグ	2.89	6020
石灰石微粉Ⅰ	2.73	3560
石灰石微粉Ⅱ	2.73	5010
石灰石微粉Ⅲ	2.73	7260

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した粉体は、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末および粉末度の異なる3種類の石灰石微粉である。これらの比重および粉末度を表-1に示す。化学混和剤変性リグニン、アルキルスルホン酸系の高性能AE減水剤を使用した。また、骨材は、表-2、3に示す物理的性質を持ったもので、粗骨材

表-2 粗骨材の物理的性質

最大寸法 (mm)	粒度分布 (累計残留率)				F.M.	比重	吸水率 (%)	単位容積 重量 (kg/l)
	20mm	15	10	5				
20	2	16	57	100	6.78	2.69	0.87	1.59

表-3 細骨材の物理的性質

5mm	粒度分布 (累計残留率)					F.M.	比重	吸水率 (%)
	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15			
0	14	36	51	76	95	2.72	2.67	1.40

- *1 鳥取大学助手 工学部土木工学科、工修 (正会員)
- *2 鳥取大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
- *3 鳥取大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
- *4 鳥取大学研究生 工学部土木工学科、工博

は碎石、細骨材は砕砂と陸砂を混合したものである。

2. 2 鉄筋間の通過性に関する実験

高流動コンクリートの鉄筋間の通過性に影響を及ぼす種々の要因のうち本研究では以下の3項目について検討を行った。

- 1) モルタルのレオロジー一定数の影響
- 2) コンクリート中の粗骨材量の影響
- 3) 鉄筋間隔(鉄筋のあき/骨材最大寸法)の影響

これらの要因が高流動コンクリートの流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響をL型フロー試験装置(図-1)、鉄筋通過性試験装置(図-2)を用いて検討を行った。L型フロー試験は水平移動距離LFおよび0~20 cmの間を流れる流動速度を測定した。鉄筋通過性試験装置の鉄筋はD13mmの異形鉄筋を用いており、鉄筋のあきは可変で本研究では以下の鉄筋のあきとした。

- ・鉄筋のあき27mm(粗骨材最大寸法の約 4/3:鉄筋を5本配置)
- ・鉄筋のあき30mm(粗骨材最大寸法の約 3/2:鉄筋を4本配置)
- ・鉄筋のあき37mm(粗骨材最大寸法の約 9/5:鉄筋を3本配置)

鉄筋通過性試験の試験方法は、L型フロー試験と同様であるが、コンクリートが流動を停止した後、鉄筋間を通過した試料および未通過の試料をそれぞれ1リッター採取し、洗い試験を行い粗骨材量を求め、両試料の単位粗骨材量の差を材料分離の指標とした。また、ウェットスクリーニングしたモルタルに対して球引上げ粘度計を用いて、モルタルのレオロジー一定数(降伏値および塑性粘度)の測定を行った。

コンクリートの配合は、セメントと高炉スラグ微粉末の混合比率を50:50とし、以下の2シリーズとした。

- 1) 粗骨材量 $850\text{kg}/\text{m}^3$ ($316\ell/\text{m}^3$)、単位水量 $170\text{kg}/\text{m}^3$ とし、水結合材比を0.32, 0.34, 0.36の3水準に変化させた。高性能AE減水剤の添加量はスランブフローが $60\pm 5\text{cm}$ となるように試練りによって決定した。
- 2) 結合材量 $500\text{kg}/\text{m}^3$ (水結合材比0.34)、単位水量 $170\text{kg}/\text{m}^3$ と一定にし、細骨材率を46, 49, 52, 55%の4水準に変化させた。高性能AE減水剤の添加量はスランブフロー $60\pm 5\text{cm}$ 、細骨材率49%のコンクリートのモルタル部分のレオロジー一定数と各コンクリートのモルタル部分のレオロジー一定数がほぼ同様な値となるように試練りによって決定した。その結果、スランブフローは細骨材率46%で55 cm、55%で70cmとなった。

上述の条件に基づいて設計したコンクリートの配合を表-4に示す。

2. 3 石灰石微粉に関する実験

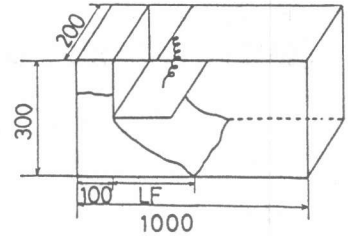


図-1 L型フロー試験装置

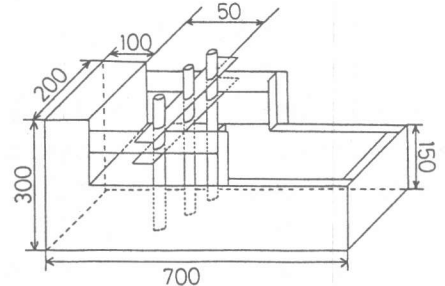


図-2 鉄筋通過性試験装置

表-4 配合表(高炉スラグ)

W/P	s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)				
		W	C	Sg	S	G
0.32	48	170	266	266	769	850
0.34	46	170	250	250	753	893
0.34	49	170	250	250	796	850
0.34	52	170	250	250	852	794
0.34	55	170	250	250	902	743
0.36	49	170	236	236	820	850

粉末度の異なる3種類の石灰石微粉を用い、単位水量 170kg/m^3 、細骨材率49%、スランプフロー $60\pm 5\text{cm}$ の条件で、石灰石微粉の置換率を0, 30, 50%の3水準、水結合材比を0.32, 0.34, 0.36の3水準に選んだ高流動コンクリートの流動性を上述したL型フロー試験、鉄筋通過性試験(鉄筋間の純間隔 30mm)およびウェットスクリーニングモルタルのレオロジー定数によって検討した。コンクリートの配合を表-5に示す。

表-5 配合表(石灰石微粉)

W/P	s/a (%)	単位重量 (kg/m^3)				
		W	C	石粉	S	G
0.32	49	170	532	0	806	846
0.32	49	170	372	159	796	835
0.32	49	170	266	266	789	827
0.34	49	170	500	0	819	859
0.34	49	170	350	150	810	859
0.34	49	170	250	250	803	842
0.36	49	170	472	0	831	871
0.36	49	170	331	141	822	862
0.36	49	170	236	236	816	856

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルのレオロジー定数、粗骨材量および鉄筋間隔が高流動コンクリートの鉄筋間通過性に及ぼす影響

図-3はL型フロー試験によって得られた流動距離(LF)、流動速度(V_L)および球引上げ粘度計によって測定された降伏値(τ_e)、塑性粘度(η_{p1})と水結合材比との関係を示したものである。本研究においては、コンクリートの条件としてスランプフローを $60\pm 5\text{cm}$ としていることもあり、L型フロー試験における各コンクリートの流動距離にはあまり差がみられず、ウェットスクリーニングモルタルの降伏値にもほとんど差が見られなかった。一方、コンクリートの流動速度は水結合材比が増加するとともに増加し、モルタルの塑性粘度は水結合材比が増加するとともに減少しており、スランプフローが同じであっても、配合によってコンクリートの流動性、粘度が異なることがわかる。本研究で得られたモルタルの塑性粘度と高炉スラグの入った流動化コンクリートのウェットスクリーニングモルタルの塑性粘度[3]を比較すると、流動化のものが $15\sim 40\text{Pa}\cdot\text{s}$ であるのに対し、高流動の場合は $60\sim 150\text{Pa}\cdot\text{s}$ となっている。高流動コンクリートは高い流動性を持ち、しかも材料分離抵抗性に優れたコンクリートとなるように材料の選定、配合あるいは増粘剤の使用等が行われているが、上述のことから高流動コンクリートのモルタル部分の塑性粘度は流動化コンクリートのそれに比べかなり大きくなっていることがわかる。

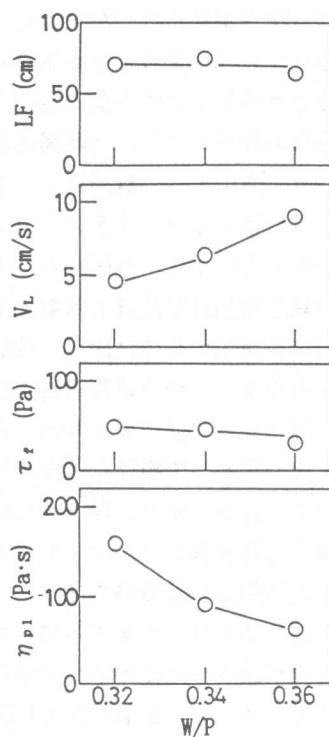


図-3 W/Pとレオロジー定数、L型フロー試験との関係

図-4は鉄筋通過性試験の結果を示したものである。縦軸の LF_s/LF は鉄筋通過性試験の流動距離をL型フロー試験の流動距離で除したものである。鉄筋通過性試験の場合には配置した鉄筋がコンクリートの流れを阻害し、粗骨材の閉塞が起こらない場合においてもL型フロー試験に比べ流動速度が遅く、慣性力が小さくなり、流動距離はL型フロー試験のそれよりも小さくなる。図中の一点鎖線は目視あるいはビデオによる分析によって判定した粗骨材の閉塞の有無の判定線($LF_s/LF=0.75$)であり、この線より上にプロットされたものは粗骨材の閉塞が起こ

らず流れたものである。また、縦軸の G_s は材料分離の指標として次式を用いて計算したものである。

$$G_s = \frac{(G_1 - G_2)}{(G_1 + G_2)} \times 100 \quad (1)$$

なお、 G_1 は鉄筋を通過していない試料の粗骨材の単位重量(kg/m^3)、 G_2 は鉄筋を通過した試料の粗骨材の単位重量(kg/m^3)である。

図-4より、鉄筋のあきが37mmの場合にはいずれのコンクリートとも粗骨材による閉塞は見られないが、鉄筋のあきが30、27mmにおいてはその程度の差はあるがいずれも閉塞が見られ、粗骨材量が $300\text{kg}/\text{m}^3$ では、モルタルのレオロジー定数よりも鉄筋間隔がコンクリートの鉄筋間通過性において支配的要因となっている。また、材料分離指標 G_s より、鉄筋間隔が骨材最大寸法の4/3倍である27mmにおいては、鉄筋によって材料分離が生じ鉄筋を通過した試料はモルタルの多いコンクリートとなっていることがうかがえる。また、本研究のモルタルの粘度の範囲では、粘度が鉄筋通過性に及ぼす影響は少ないが、粘度が $60\text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度の試料が他のものに比べ、鉄筋のあきが30、37mmでは材料分離も少なく、やや鉄筋間通過性がよくなる傾向がみられた。

図-5は鉄筋のあき30mmにおいてモルタルのレオロジー定数を一定として粗骨材量を変化させた場合の鉄筋通過性試験結果である。また、図-6は縦軸に LF_s/LF を、横軸に鉄筋間隔と粗骨材最大寸法の比を粗骨材量で除した値 M をとり、両者の関係を見たものである。

図-5より、モルタルのレオロジー定数が同じ場合、粗骨材量が減少するに伴って鉄筋間の通過性が向上する傾向が見られ、本研究の配筋状態では閉塞を起こさずに流れるのは粗骨材量 $276\text{ }\ell/\text{m}^3$ 以下の場合であった。しかし、高流動コンクリートの充填性に及ぼす粗骨材量の影響は配置された鉄筋の状態によって異なる。モルタルの粘度に関してはコンクリートの充填性を最大にする最適な粘度が存在することが示唆されている[4]が、鉄筋間隔、粗骨材量に関しては鉄筋間隔は広くなるほど、コンクリートが良好な鉄筋間通過性を示す限界の粗骨材量は多くなり、鉄筋間隔が狭くなれば、限界の粗骨材量は少なくなると考えられる。そこで、鉄筋間隔と粗骨材量をともに考慮した指数 M と LF_s/LF の検討を行った。図-6はその結果であるが、図より指数 M がある値以上においてコンクリートが鉄筋間を良好に流れることがわかる。本研究の条件では、コンクリートが鉄筋間を良好に流れ

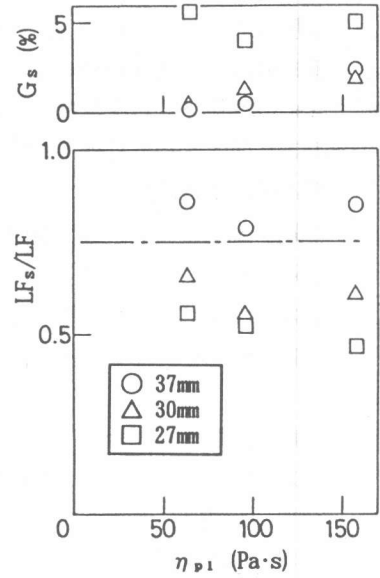


図-4 鉄筋間隔の影響

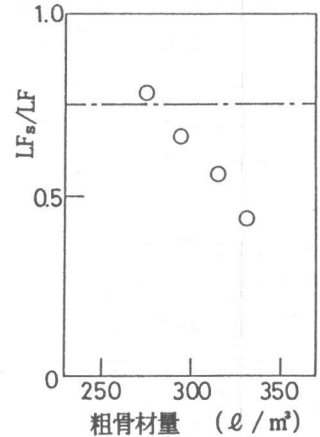


図-5 粗骨材量の影響

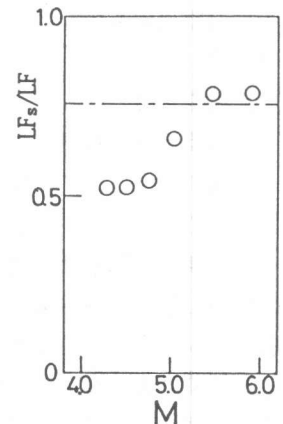


図-6 LF_s/LF と M との関係

る指数Mの値は 5.4であるが、これはモルタルのレオロジー一定数によって変化するものと考えられる。

3. 2 石灰石微粉を混和材として用いた高流動コンクリートの流動性

高流動コンクリートの混和材の一種として石灰石微粉が用いられている。ここでは、粉末度が $3560\text{cm}^2/\text{g}$

(微粉Ⅰ)、 $5010\text{cm}^2/\text{g}$ (微粉Ⅱ) および $7260\text{cm}^2/\text{g}$ (微粉Ⅲ) の3種類の石灰石微粉によるセメントの置換が高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響を検討する。石灰石微粉は水硬性がなく強度発現には寄与しないと考えられ、強度と関連する水セメント比は W/Pと石灰石微粉置換率との組み合わせにおいて表-6のようになる。

表-6 石灰石微粉置換によるW/Cの変化

置換率 (%)	W/P		
	0.32	0.34	0.36
30	0.46	0.49	0.51
50	0.64	0.68	0.72

図-7は W/Pが 0.34 である場合の石灰石微粉置換率とL型フロー速度およびモルタル部分の塑性粘度との関係を示したものである。また、図-8は置換率 50 %の場合の W/PとL型フロー速度および塑性粘度との関係を示したものである。

高炉スラグの場合、スラグの粉末度が流動性に及ぼす影響に関して、粉末度 $4000\sim 6000\text{cm}^2/\text{g}$ では、その影響の度合いに大きな差はないが、粉末度が 6000 から $7000\text{cm}^2/\text{g}$ に変化すると流動性がかなり低下するといわれているが[5]、本研究で用いた石灰石微粉の場合、L型フロー試験の結果では、粉末度の一番大きい微粉Ⅲが粘度が小さく、流動性のよい結果となった。また、置換率の影響も微粉Ⅰ、Ⅱでは、モルタル部分の塑性粘度およびコンクリートの流動速度とも置換を行わない場合とほとんど変わらないが、微粉Ⅲでは置換率の増加とともにモルタル部分の塑性粘度が小さくなり、流動性が向上した。

図-8には参考のために粉末度 $6020\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグを置換した場合のデータをプロットしているが、微粉Ⅰを用いたコンクリートは各W/Pとも高炉スラグとほぼ同じ流動性を示した。一方、微粉Ⅲを用いたコンクリートは各W/Pとももっとも高い流動性を示したが、W/P=0.36においてはL型フロー試験に供したとき、モルタルが先行し、粗骨材とモルタルが一体となった流れとなっておらず、分離傾向が認められた。

高炉スラグと異なり、粉末度の一番大きい微粉Ⅲを用いたコンクリートがもっとも流動性がよくなった原因を考察するために、各微粉の粒径の分布の測定を行った。図-9にその結果を示す。

図より、微粉Ⅲは粉末度はもっとも大きい、その粒形はかなりの広範囲に渡っており、セメントと置換した場合に粉体の実積率が大きくなるものと考えられる。粉体の粉末度と実積率はともにセメントペーストの塑性粘度に影響を及ぼし、粉末度が小さくなるにしたがって、また実積率

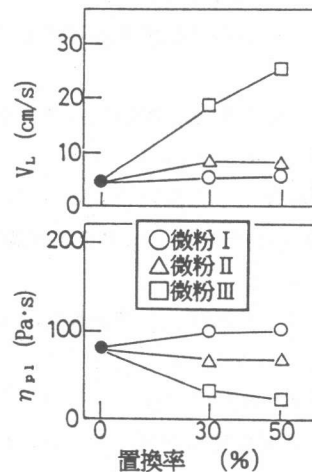


図-7 置換率の影響

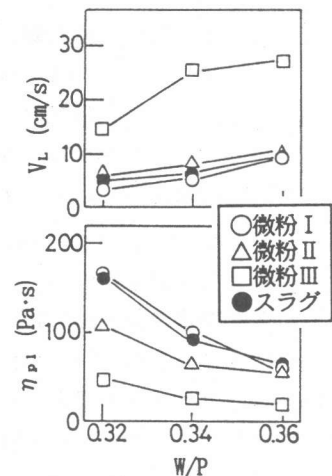


図-8 W/Pの影響

が大きくなるにしたがって塑性粘度が小さくなることがわかっており[6]、本研究で用いた微粉Ⅲは粉末度の影響よりも実積率が大きくなることによる塑性粘度の低下が大きく、微粉Ⅲを用いたコンクリートの流動性が大きくなったものと考えられる。

4. まとめ

本研究は、使用材料あるいは配合が高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響を把握することを目的とし、まず、モルタルのレオロジー定数、粗骨材量および鉄筋間隔を試験要因に選び、それらが高流動コンクリートの鉄筋間の通過性に及ぼす影響を個々に検討した。次に高流動コンクリートの混和材の一種として用いられている石灰石微粉が高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響を粉末度の異なる3種類の石灰石微粉を用いて実験的に検討した。以下に本研究の主な結果を要約し、まとめとする。

1) 本研究で選択した要因の中では、モルタル部分のレオロジー定数の影響より、鉄筋間隔および粗骨材量がコンクリートの鉄筋間通過性に及ぼす影響が大きく、粗骨材量 316 l/m^3 の場合には鉄筋間隔が粗骨材最大寸法の $9/5$ ではコンクリートは閉塞せず流れるが、粗骨材最大寸法の $3/2$ 以下では閉塞した。また、鉄筋間隔と粗骨材最大寸法の比を粗骨材量で除した値が、鉄筋間をコンクリートが良好に通過するかどうかの指標となりうる。

2) 本研究で用いた石灰石微粉では、高炉スラグで見られるような粉末度の増加に伴うコンクリートの流動性の低下は見られず、逆にもっとも粉末度の大きい石灰石微粉を用いたときコンクリートの流動性がもっとも良好であった。これは、石灰石微粉の粒径分布に伴う粉体の実積率が大きくなったためと考えられる。

《参考文献》

- [1] 近松竜一ほか：高流動コンクリートの流動性を評価する方法，セメント・コンクリート，No.530，pp.60～66，1991.
- [2] 三浦律彦ほか：超流動コンクリートの過密配筋構造物への適用に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.92～100，1992.
- [3] 西林新蔵ほか：高炉セメントを使用した流動化コンクリートの性質に関する基礎的研究，フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集，JCI，pp.31～36，1989.4
- [4] 名和豊春ほか：高流動コンクリートの配合と流動性に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.369～374，1992.
- [5] 近田孝夫・松下博通・前田悦孝：高炉スラグ粉末を用いたセメントペーストのレオロジー特性，コンクリート年報工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.113～118，1991.6
- [6] 吉野 公・西林新蔵・黒田 保：結合材の性質がペーストのレオロジー定数に及ぼす影響，土木学会学第47回年次学術講演会概要集，第5部，pp.586～587，1992.9

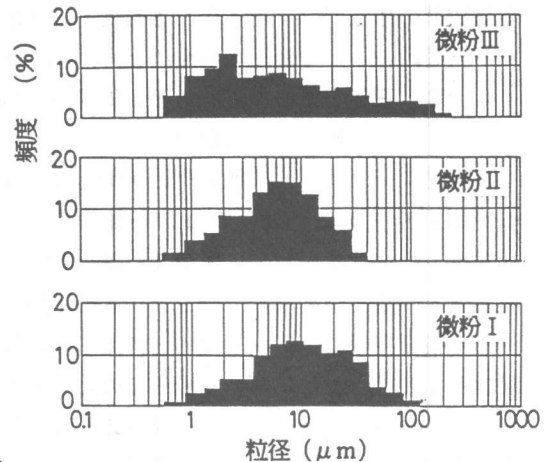


図-9 石灰石微粉の粒径分布