

論文 高水セメント比における粉体系高流動コンクリートの物性に関する研究

山田尚義^{*1}・佐藤貢^{*2}・上原匠^{*3}・梅原秀哲^{*4}

要旨：高水セメント比領域の粉体系高流動コンクリートに関して、単位水量一定のもと、水セメント比と水粉体容積比を配合要因として、材料分離抵抗性を含むフレッシュコンクリートの性状および硬化コンクリートの物性について実験的検討を行った。その結果、同じ水粉体容積比で、同程度のスランプフローを有するコンクリートの材料分離抵抗性の程度は、水セメント比により差が生じることが明らかとなった。

キーワード：粉体系高流動コンクリート、石灰石微粉末、材料分離抵抗性

1. はじめに

高流動コンクリートは、通常のコンクリートと比較して著しく流動性を増加させることで打設時に締固めが不要あるいは不要に近いコンクリートと定義され、現在も様々な材料と配合に対する研究、開発がなされている¹⁾²⁾。

高流動コンクリートは、粉体系、増粘剤系および併用系とあるが、いずれもコンクリート中で流体として挙動するペーストの量をある程度以上確保する必要がある。ペースト量の確保には、通常は耐久性の観点から粉体量を多くする。そのため化学反応性の高い結合材を増やすと、必要以上の強度増進、収縮量の増加、温度ひび割れの発生などの問題が生じる。とくに粉体系高流動コンクリートは、材料分離抵抗性を確保する方法を粉体の量に依存しているため、水セメント比が小さくなりがちであり、水セメント比が50%以上を対象とした高水セメント比での粉体系高流動コンクリートの研究は十分でないのが現状である³⁾。

本研究では、増粘剤を用いない粉体系高流動コンクリートに関して、単位水量一定のもと、水セメント比を38%から65%の範囲にすることで、高水セメント比の高流動コンクリートに

おける、水セメント比、粉体量および高性能AE減水剤の使用量が、材料分離抵抗性を含むフレッシュコンクリートの品質および硬化物性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

粉体には、結合材として早強ポルトランドセメントを、非結合材として化学的な活性の小さい石灰石微粉末⁴⁾を使用し、高性能AE減水剤にはポリカルボン酸系のものを使用した。今回使用した石灰石微粉末は、比重2.73、比表面積5090cm²/gである。その化学組成を表-1に示す。また、本実験に使用した材料の特性を表-2に示す。

2.2 コンクリートの配合設計⁵⁾

本実験で使用したコンクリートの配合を表-3に示す。すべての配合において、単位水量、単位粗骨材量を一定とした。単位粗骨材絶対容積は、0.292 m³/m³である。配合は、水セメント比を65%、

表-1 LPの化学組成

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
含有量	53.91	1.85	0.20	0.09	0.62

*1 名古屋工業大学大学院

工学研究科社会開発工学専攻（正会員）

*2 名古屋工業大学大学院

工学研究科都市循環システム工学専攻

*3 名古屋工業大学助教授

工学部社会開発工学科 工博（正会員）

*4 名古屋工業大学大学院教授

都市循環システム工学専攻 Ph.D.（正会員）

表-2 使用材料

材料	種類	記号	物性・成分	石灰石微粉末の平均粒径は約30 μ m ふるいにこたまる量の累計(%)	
セメント	早強ポルトランドセメント	C	比重3.13, 比表面積4550cm ² /g		
混和材	石灰石微粉末	LP	比重2.73, 比表面積5090cm ² /g	300 μ m	0.02%
細骨材	山砂	S	比重2.56, 吸水率1.65%, 粗粒率2.77	150 μ m	5.50%
粗骨材	碎石2005	G	比重2.65, 吸水率0.61%, 粗粒率6.64	75 μ m	22.00%
混和剤	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系	45 μ m	40.00%

表-3 配合表

配合 No.	W/C (%)	水粉体 容積比	s/a (%)	細骨材容積比 V_S / V_M (%)	LP置換率 $V_{LP} / (V_{LP} + V_S)$ (%)	単位量(kg/m ³)				
						W	P		S	G
							C	LP		
1	65.0	2.04	58.6	62	0	167	257	0	1060	774
2		1.36	56.1	56	10			112	955	
3		1.19	54.9	54	14			158	911	
4		1.01	53.1	50	20			227	847	
5		0.81	49.8	44	30			339	742	
6	53.4	1.67	57.6	60	0	167	313	0	1014	774
7		1.19	54.9	54	10			109	911	
8		0.81	49.8	44	27			289	742	
9	47.6	1.49	56.8	58	0	167	351	0	983	774
10		1.19	54.9	54	7			76	911	
11		0.81	49.8	44	24			257	742	
12	38.0	1.19	54.9	54	0	167	439	0	911	774

53.4%, 47.6%, 38%の4水準, 粉体量の影響を検討するため水粉体容積比を 1.19, 0.81 の2水準とし, それらを組み合わせて行った。また, 高水セメント比での粉体量の影響をより細かく検討する目的で, 水セメント比 65%の場合のみ, さらに水粉体容積比を 2.04, 1.36, 1.01 の3水準加えて行った。

コンクリートの目標スランプフロー, 目標空気量は, それぞれ 50 ± 5 cm, $4.5 \pm 1.0\%$ とし, 目標値内におさまるように, 高性能 AE 減水剤, AE 助剤をそれぞれ適宜使用した。

2.3 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには, 公称容量 100 ℓ の水平パン型強制練りミキサを用いて 60 ℓ で行った。練混ぜ時間は, モルタル先練り 45 秒間, 粗骨材投入後 180 秒間とした。

2.4 試験項目

フレッシュコンクリートの試験項目は, スランプフロー試験, 空気量試験, 単位容積質量試験, SI 試験である。また, 硬化コンクリートの試験項目は, 圧縮強度試験, ヤング係数試験,

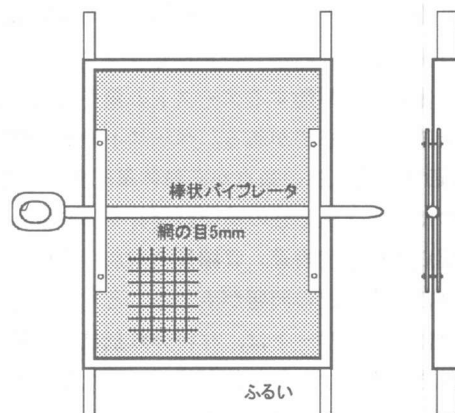


図-1 SI 試験装置

引張強度試験である。

SI 試験とは 5mm ふるいに棒状バイブレータを取り付け, 振動エネルギーを与えることによって, 粗骨材とモルタルとの材料分離抵抗性の評価を行うものである。SI 試験装置を図-1に示す。SI 値はバイブレータによって 60 秒間振動を与えた場合, SI_0 値は外力を与えず 5 分間静置した場合の(落下したモルタル質量) / (全モルタル質量) の百分率で表される。全モ

ルタル量は、コンクリート試料約 7ℓの質量から試験後のふるいに残る粗骨材質量を差し引くことで算定される。試験は各バッチ毎にそれぞれ1回行った。

SI 試験では、通常のスランプでのコンクリートの材料分離抵抗性の評価が可能であり、SI値が 60%以上の領域で分離の傾向が見られるとされている⁹⁾。本実験では高流動コンクリートを対象にすることから、各配合におけるモルタルと粗骨材の分離抵抗性能の比較に用いた。

3. フレッシュコンクリートの実験結果

3.1 材料分離

フレッシュコンクリートの各試験結果の一覧を表-4 に示す。表中の「状態」は、スランプフローでの目視判断による材料分離の程度を示

している。スランプフローの到達点が粗骨材から分離したモルタルの到達距離で表される場合を分離、中心部分と到達周辺での粗骨材の分布が異なる場合をやや分離とした。

水セメント比 65%, 53.4%, 47.6%における LP 無混入の配合では、いずれも材料分離を生じない状態での最大スランプフローは、目標スランプフローに達しなかった。また、材料分離を生じずに広がるスランプフローの到達距離は、水粉体容積比が大きいほど短くなることがわかった。このことから、水セメント比が高い領域では、単位セメント量が少ないことから、セメントとは別に、粉体の混入が不可欠であることが確認された。目標スランプフロー500mm 程度の良好なコンクリートを得るために必要とされる水粉体容積比は 1.19 以下である。

表-4 フレッシュおよび硬化コンクリートの実験結果

配合 No.	W/C (%)	水粉体 容積比	高性能AE減水 剤添加率		スラ ンプ (cm)	スラン プ フロー (mm) × (mm)	空気量 (%)	単位 容積 質量 (t/m ³)	SI値 (%)	SI ₀ 値 (%)	状態	圧縮強度	ヤング係数	割裂強度
			(C×%)	(P×%)								28 日		
												(N/mm ²)	× 10 ⁴ N/mm ²	(N/mm ²)
1*		2.04	1.20	1.20	4.5	200 × 200	3.6	2.34	37.2	0.0	良好	33.8	3.25	1.79
			1.40	1.40	18.5	375 × 350	4.5	2.29	40.4	1.7	やや分離	27.0	2.91	1.77
			1.60	1.60	18.5	490 × 410	4.9	2.27	39.5	4.6	分離	26.6	2.93	1.90
2		1.36	1.20	0.84	22.0	325 × 315	3.5	2.33	48.1	0.0	良好	38.7	3.32	1.95
			1.40	0.98	23.5	475 × 465	4.8	2.28	51.1	4.4	良好	34.6	3.26	2.16
			1.60	1.11	23.0	540 × 525	3.5	2.32	51.0	7.2	分離	35.5	3.60	2.65
3	65.0	1.19	1.20	0.74	23.0	325 × 315	5.0	2.27	52.7	0.0	良好	34.4	3.41	2.21
			1.40	0.87	24.0	475 × 465	5.0	2.28	53.2	0.9	良好	35.3	3.28	2.32
			1.50	0.93	24.0	520 × 515	7.0	2.23	53.9	3.5	良好	31.7	3.03	2.16
			1.60	0.99	24.0	605 × 575	0.1	2.40	56.7	7.5	分離	44.2	3.97	2.72
4		1.01	1.20	0.64	23.0	370 × 365	5.0	2.29	51.8	3.0	良好	36.6	3.43	1.98
			1.40	0.74	24.0	480 × 460	4.8	2.29	48.1	4.6	良好	36.7	3.37	1.82
			1.60	0.85	24.5	590 × 570	1.0	2.38	62.4	8.1	分離	44.3	3.61	2.30
5		0.81	1.20	0.52	15.0	260 × 260	1.6	2.37	47.0	0.1	良好	45.0	3.84	2.82
			1.40	0.60	22.5	400 × 380	3.5	2.37	56.9	4.3	良好	45.4	3.49	3.15
			1.60	0.69	24.5	500 × 480	4.8	2.31	63.0	3.6	良好	41.8	3.55	2.48
6*	53.4	1.67	1.30	1.30	21.0	380 × 380	3.6	2.33	40.5	0.6	やや分離	47.4	3.55	2.52
1.19		1.40	1.04	25.0	500 × 500	5.5	2.30	59.4	7.2	良好	37.7	2.87	2.13	
0.81		1.60	0.83	24.5	510 × 510	5.0	2.32	62.9	8.2	良好	43.3	3.37	2.69	
9*		1.49	1.20	1.20	23.0	440 × 420	1.2	2.36	53.8	0.7	良好	-	-	-
			1.30	1.30	23.0	480 × 480	3.5	2.33	47.4	2.6	やや分離	52.9	3.72	3.25
10	47.6	1.19	1.30	1.07	25.0	510 × 510	5.4	2.30	62.5	7.8	良好	43.7	3.23	3.28
11		0.81	1.30	0.75	4.5	200 × 200	2.1	2.36	25.7	0.0	良好	-	-	-
	1.60		0.92	24.5	530 × 510	5.5	2.29	62.6	14.1	良好	44.7	3.14	2.87	
12*	38.0	1.19	1.00	1.00	23.0	450 × 450	2.7	2.36	60.1	0.0	良好	-	-	-
			1.05	1.05	24.5	495 × 485	3.8	2.34	63.3	7.5	良好	71.8	4.00	3.91
			1.10	1.10	24.5	555 × 545	3.5	2.33	72.3	-	やや分離	74.0	4.02	-

* : LP無混入の配合

材料分離したコンクリートは、練上がり直後において、コンクリート表面に比較的大きな気泡が確認できたにもかかわらず、空気量は目標値を得ることができなかった。これは、モルタルの粘性が低くなり空気の連行性が落ちたためと考えられる。材料分離抵抗性と SI 値、 SI_0 値の間には明確な相関関係は得られなかった。これは、スランプフローが異なることに加え、水粉体容積比も異なるためと考えられる。

フレッシュコンクリートの試験結果より、水セメント比に関係なく、水粉体容積比が 1.19 の配合においては、材料分離が生じないスランプフローの限界値は 50cm 程度となった。単位水量一定の場合には、水セメント比が 65% と高い領域においても水セメント比が低い場合と同様に、材料分離のない良好なスランプフローの最大値に与える影響は、水粉体容積比が大きく影響しているといえる。ただし、水粉体容積比 0.81 の配合では、今回の試験では全て良好

なコンクリートのため、スランプフローの最大値を特定できなかった。

3.2 水セメント比の影響

水セメント比の変化に伴う、目標スランプフローを得るためのフレッシュ性状への影響について、SP 添加率と SI 試験に着目して考察を行った。ここでは目標スランプフロー 50cm を満足した良好なコンクリートを対象とした。水セメント比と、単位セメント量に対する SP 添加率の関係を図-2 に、水セメント比と、粉体質量に対する SP 添加率の関係を図-3 に、水セメント比と SI 値の関係を図-4 に、水セメント比と SI_0 値の関係を図-5 にそれぞれ示す。

図-2 より、水粉体容積比が大きい 1.19 の場合、水セメント比が減少するとともに SP 添加率も減少することがわかる。しかし、水粉体容積比 0.81 の場合は一定であった。一方、図-3 では、水粉体容積比が 1.19 の場合の、添加率の差は小さく、逆に水粉体容積比 0.81 の場合に

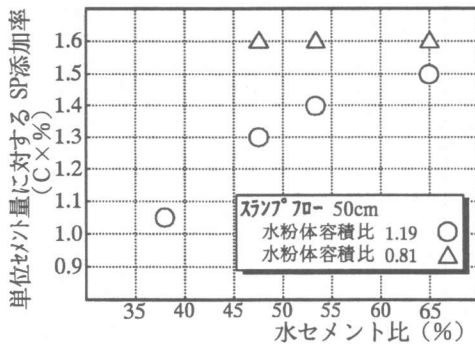


図-2 水セメント比と SP 添加率の関係 I

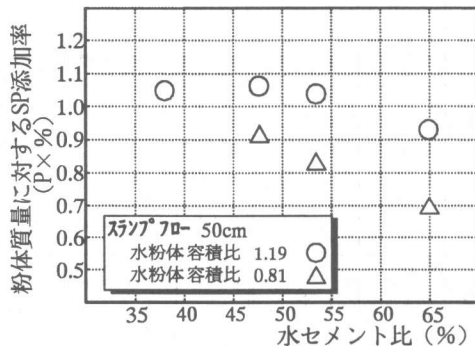


図-3 水セメント比と SP 添加率の関係 II

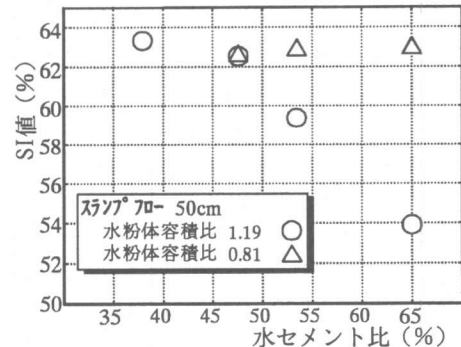


図-4 水セメント比と SI 値の関係

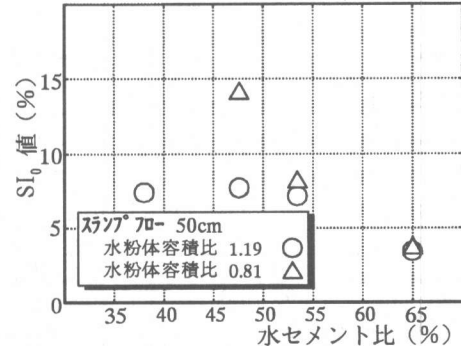


図-5 水セメント比と SI_0 値の関係

差が明確に表れた。以上より、水セメント比がスランプフローに与える影響は、水粉体容積比が小さい場合は単位セメント量に対する添加率で、水粉体容積比が大きい場合は粉体質量に対する SP 添加率で制御した方が小さくなるとの結果が得られた。

図-4 より、水粉体容積比が 1.19 の場合、SI 値は水セメント比が減少するにつれて増加している。しかし、水粉体容積比が 0.81 の場合はほとんど差が見られなかった。これは、振動など外力を与えた場合の材料分離抵抗性は、水粉体容積比が小さいほど、水セメント比の違いによる差が小さく一定値となることを示す結果となった。

図-5 より、水粉体容積比が一定の場合、 SI_0 値は、水セメント比が減少するにつれて増加している。これは、水セメント比が大きい方が、すなわち今回の配合では、ペースト中に LP が占める割合が大きい方が、材料分離抵抗性が大きいものと考えられる。また、水セメント比が大きいほど、水粉体容積比の違いによる差は小さくなった。

高流動コンクリートにおいては打設時に外力を与えないため、材料分離抵抗性は SI_0 値で検討する方が良いと判断される。今回の試験結果より、水粉体容積比が同じで、同程度のスランプフローを有するコンクリートにおいては、 SI_0 値で材料分離抵抗性の比較は可能であると考えられる。

3.3 高水セメント比での水粉体容積比の影響

ここでは、高水セメント比での水粉体容積比の違いが、フレッシュコンクリートに与える影響を明らかにするために、水セメント比 65% を対象に考察を行った。

図-6 に水粉体容積比とスランプフローの関係を示す。単位セメント量および SP の使用量が同量の場合、スランプフローは、水粉体容積比が 1.2~1.0 の時にピークが見られた。これは、今回の実験は単位水量一定のもとで行ったため、水粉体容積比が大きい領域ではペースト

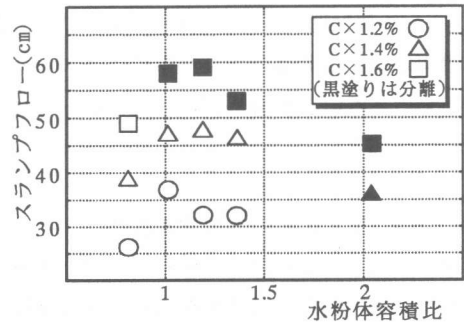


図-6 水粉体容積比とスランプフローの関係

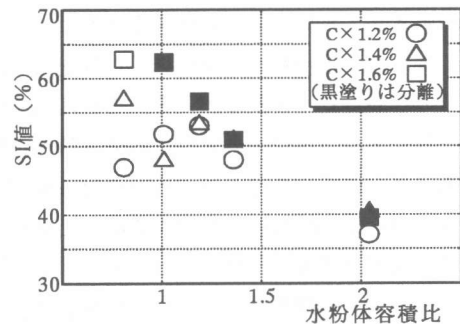


図-7 水粉体容積比と SI 値の関係

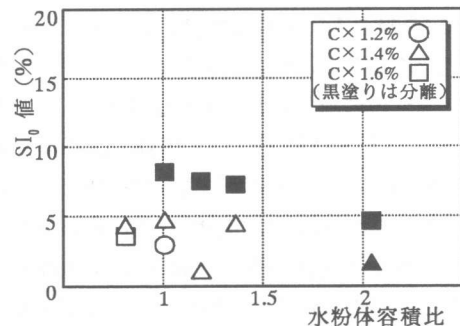


図-8 水粉体容積比と SI_0 値の関係

分の不足が、水粉体容積比が小さい領域ではペーストの粘度の増大が要因になったものと考えられる。また、いずれの水粉体容積比においても SP の使用量の増加によるスランプフローの伸び率は同程度であった。

水粉体容積比と SI 値との関係を図-7 に、水粉体容積比と SI_0 値の関係を図-8 に示す。SP の使用量増加にともない、いずれの値もわずかに増加する結果となった。これはペーストの流動性が増すことで、コンクリート中のモルタルの流動性も増加し、付着力の低下が生じたものと考えられる。また、水粉体容積比の減少にと

もない SI 値は明確に、 SI_0 値もわずかではあるが増加した。これはモルタル中のペースト分が増加し、ふるい目の通過性が大きくなったものと考えられる。

4. 硬化コンクリートの実験結果

表-4 に 28 日における圧縮強度、ヤング係数および引張強度の試験結果を示す。材料分離を生じたコンクリートの圧縮強度にはばらつきが見られる。これは、材料分離を生じたコンクリートは、空気連行性が極端に低くなり空気が適性値でなかったことが原因と考えられる。また、同一水セメント比において、水粉体容積比が減少するにつれて、すなわち LP の使用量が増加するにつれて圧縮強度は増加する結果となり、水粉体容積比 0.81 の配合では、水セメント比が 65% と高い領域であっても 40 N/mm^2 以上の圧縮強度を発揮した。その際、同一水セメント比で LP 無混入の配合と比較して、 15 N/mm^2 程度大きくなることが確認された。これは、微細な空隙への均一な充填によるものと考えられる。

図-9 に圧縮強度とヤング係数の関係の一例を、図-10 に圧縮強度と引張強度の関係の一例を示す。なお、図に示す実線は「高流動コンクリートに関する技術の現状と課題」に記されているものを引用した³⁾。圧縮強度とヤング係数の関係、圧縮強度と引張強度の関係は、ともに水粉体容積比の違いによる差は見られなかった。しかし、LP の混入率が高い場合に、土木学会式と比較してヤング係数は若干高い値に、引張強度は若干低い値となった。

5. 結論

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 水セメント比が 65% と高い領域においても水セメント比の低い場合と同様に、材料分離のない良好なコンクリートのスランプフローの最大値は、水粉体容積比が大きく影響する。

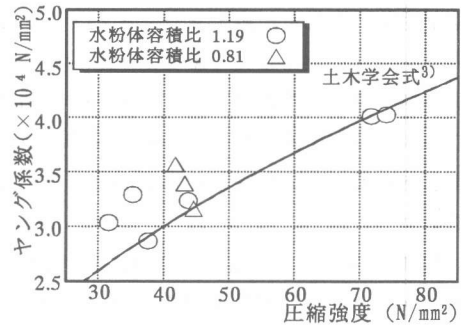


図-9 圧縮強度とヤング係数の関係

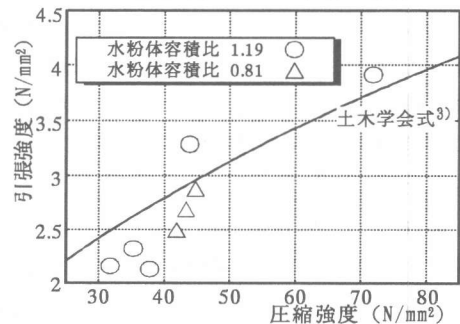


図-10 圧縮強度と引張強度の関係

- (2) フレッシュコンクリートで同一の水粉体容積比、同程度のスランプフローを有する高流動コンクリートの材料分離抵抗性は、水セメント比により差が見られる。
- (3) 水セメント比が 65% の配合において、石灰石微粉末を外割で置換した場合、無混入の配合と比較して、圧縮強度が 15 N/mm^2 程度大きくなる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書 (I)1993 年, (II)1994 年
- 2) 土木学会：自己充填コンクリートセミナー論文報告集, コンクリート技術シリーズ No.19, 1997 年
- 3) 土木学会：高流動コンクリートに関する技術の現状と課題, コンクリート技術シリーズ 15, 1996 年
- 4) 土木学会：高流動コンクリート施工指針, 1998 年
- 5) 日本コンクリート工学協会：「石灰石微粉末研究委員会報告」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.49~58, 1998
- 6) 木村昌博：コンクリートの材料分離の定量化に関する研究, 名古屋工業大学修士論文, 1989 年