

論文 高性能流動化コンクリートの開発研究

後藤和正 *1・渡辺健治 *2・戸堀悦雄 *3・細田高明 *4

要旨：ベースコンクリートに粉体流動化剤と分離低減剤を後添加することにより製造され、高流動コンクリートと通常のコンクリートの間の流動性を有するコンクリートを高性能流動化コンクリートと定義した。このコンクリートについて間隙通過性および分離抵抗性を検討し、良好な性状を示す調合を選定した。さらに、この調合条件および製造方法によるコンクリートのプリーディングおよび強度・耐久性を検討し、ベースコンクリートと同等であることを明らかにした。

キーワード：高流動、粉体流動化剤、分離低減剤、間隙通過性、コンクリート

1. はじめに

現在、RC構造物のデザインや構造設計の多様化等により充填の困難な部位へのコンクリートの打設が要求され、作業員の不足によりコンクリート打設時の省力化が望まれている。この要求を満足するものとして、高流動コンクリートがあるが、現状ではレディーミクストコンクリート工場で特殊な材料（特殊セメント、混和材、高性能減水剤、分離低減剤等）を使用することや、設備の増設（材料貯蔵ビン等）を必要とすることが多く、JIS表示許可を受けたレディーミクストコンクリート工場でも製造が困難な場合があるうえに、運搬等により流動性の変動が大きくなり品質管理が難しくなることがある。

一方、高流動コンクリート（スランプフロー55cm以上）より低い流動性（スランプフロー45cm程度）でも良好な性状のコンクリートであれば、通常の打設部位では締め固め作業の低減による省力化が実現でき、打設困難な部位では打込み不具合を低減することができると考えられる。

本研究では、上記性能のコンクリートを、レディーミクストコンクリート工場で通常の使用材料を用いて製造したベースコンクリートに、粉体流動化剤および分離低減剤を後添加することにより製造する流動化コンクリートを開発した。なお、流動化時の投入管理を容易にするために粉体の流動化剤および分離低減剤はパック化を行った。また、騒音が問題になる場合は適用場所や適用数量により、有効な対策をたてるか高流動コンクリートとの使い分けが必要と考えている。

本報では、高流動コンクリートと通常のコンクリートの間の流動性を有するこの流動化コンクリートを高性能流動化コンクリートと定義して、このコンクリートが良好なフレッシュ性状を示す調合条件を明らかにすると同時に硬化後の物性を確認することを目的として検討を行った。

2. 調合の検討

2.1 目的

水セメント比50%程度の条件で、設定した流動性が得られ、かつ間隙通過性および分離抵抗性

* 1 大成建設 技術研究所 材料研究部 建築材料研究室、工修（正会員）

* 2 大成建設 技術研究所 材料研究部 建築材料研究室、工博（正会員）

* 3 ライオン 化学品研究所（正会員）

* 4 ライオン 化学品研究所

が良好な高性能流動化コンクリートの調合条件を明らかにすることを目的とした。

2.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（比重3.16、比表面積3260cm²/g）を使用した。使用した骨材の種類および品質を表-1に、混和剤の種類を表-2に示す。分離低減剤は、水溶液粘度が異なる2種類とした。分離低減剤Aは分離低減剤Bの3倍濃度の水溶液とほぼ同等の水溶液粘度を示す。

2.3 調合条件の検討

(1) 試験方法

試験を行ったコンクリートの調合条件を表-3に示す。試験には細骨材A（山砂）を主に用い、表中の◎では細骨材B（砕砂）についても試験を行った。

分離低減剤として分離低減剤Aを用い、使用量は60g/m³とした。水セメント比は50%で一定にし、単位水量

(165~180 kg/m³) および粗骨材量 (280~360 g/m³) を変化させて各試験に供した。コンクリートの製造は、パン型強制練りミキサーにより、ベースコンクリート（目標スランプ15cm）を製造し、分離低減剤および流動化剤を混合して添加し、120秒間攪拌することにより行った。目標スランプフローは45±5cm（スランプ約23cm）、目標空気量4.5%とした。

試験項目は、スランプ、スランプフロー、空気量およびN/Lフロー試験であり、流動化後に測定を行った。N/Lフロー試験は、図-1に示すLフロー試験装置〔1〕とこの装置のコンクリートの出口の高さを50mmにしたNフロー試験装置を用い、鉛直部の函体にコンクリートを充填したのちに鉛直部と水平部の境界に設置された仕切り板を引き上げてコンクリートを水平部に流動させたときの水平流動距離を測定する試験である。各々の装置で測定した値をLフロー値およびNフロー値とし、Nフロー値のLフロー値に対する割合をN/L値とした。コンクリートがNフロー試験装置の間隙に妨げられずに流動できれば、Nフロー値がLフロー値とほぼ同等になるので、N/L値が0.8以上であれば良好に間隙を通過したと判断した。本報ではこのように自体の流動性に相応な範囲でコンクリートがNフロー試験装置の5cmの間隙を通過する性状を間隙通過性とした。また、N/L値は、粗骨材の沈降が著しい場合には間隙に粗骨材が閉塞するため分離抵抗性の一指標にもなると考えられる。

表-1 骨材の種類および品質

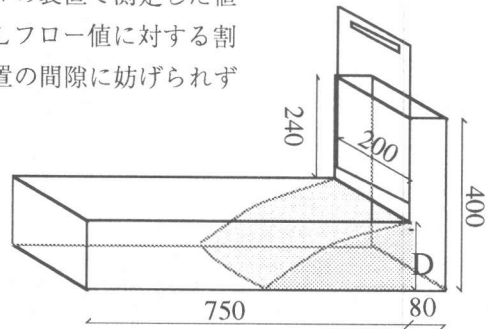
	混合率 (%)	種類	産地	表乾比重	吸水率 (%)	実積率 (%)	洗い損失率 (%)	粗粒率
細骨材 A	100	山砂	木更津	2.59	1.96	66.4	1.96	2.68
細骨材 B	60	砕砂	青梅	2.59	1.51	64.3	2.9	2.91
	40	山砂	鹿島	2.66	1.14	68.4	1.0	1.99
粗骨材	50	硬砂岩	青梅	2.65	0.70	58.9	0.51	6.19
	50	系砕石		2.65	0.56	60.6	0.47	7.07

表-2 混和剤の種類

	主成分
AE減水剤	リグニルスルホン酸系
流動化剤	ポリスルホン酸系
分離低減剤 A	ヒドロキシエチルセルロース(2%水溶液粘度：約5000mPa·s)
分離低減剤 B	ヒドロキシメチルセルロース(2%水溶液粘度：約500mPa·s)

表-3 実験調査

粗骨材量 (l/m ³)		単位水量 (kg/m ³)				
		G28	G30	G32	G34	G36
280	300		○	○	○	○
320	340	○	○	◎	○	
360		○	◎	◎	○	
165	170		○	○		
175	180		○	○		



L70- : D=160mm , N70- : D=50mm

図-1 L70-およびN70-試験装置

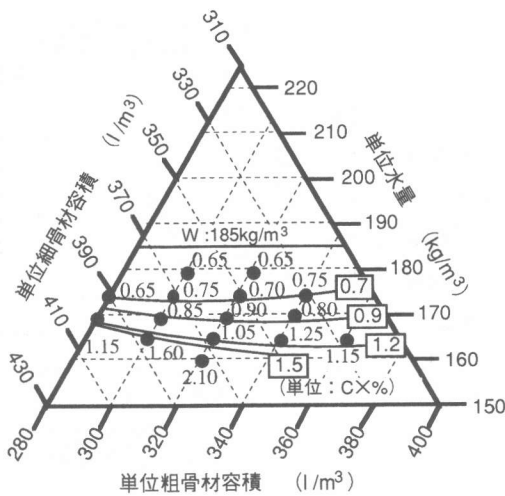


図-2 流動化剤の添加量

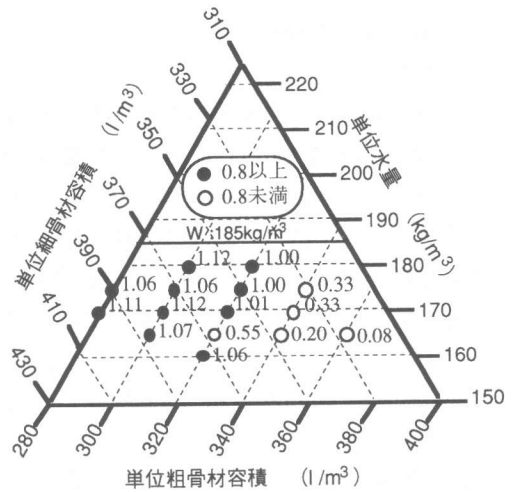


図-3 N/Lフロー試験結果 (N/L値)

(2) 試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。流動化後のスランブフローは目標値を満足した。空気量は、粗骨材量の多い割合では目標値よりも低くなる傾向があった。コンクリートの練り上がり温度はいずれも $20 \pm 2^\circ\text{C}$ であった。

流動化剤添加量の分布を図-2に示す。同一のスランブフローとするために必要な流動化剤量は、単位水量の減少にともない増加し、単位水量が低い範囲では細骨材率の増大にともない増加する傾向があった。特に単位水量が少なく、細骨材率が大きい範囲では流動化剤の使用量が急激に増加した。

図-3にN/L値の分布を示す。粗骨材量が 320 g/m^3 以下ではN/L値はほぼ1以上を示し、 320 g/m^3 を越えるとNフロー試験装置でコンクリートの閉塞が顕著に認められ、N/L値は急激に低下した。従って、粗骨材量が間隙通過性に及ぼす影響が大きいことがわかる。また、細骨材を山砂から角ばった形状の砕砂(混合)に変えて試験を行った結果(表-5)においても、粗骨材量 320 g/m^3 でN/L値は0.9以上あり間隙通過性の悪化は認められなかった。したがって、本研究の範囲では、間隙通過性に細骨材の種類が与える影響は小さいと考えられる。また、粗骨材として粒径が良好ではない碎石を用いていることから、一般に粗骨材量が 320 g/m^3 以下であれば、間隙通過性は良好である可能性が高いと考えられる。さらに、試験に供したコンクリートは、目視でもモルタルと粗骨材あるいはペーストとモルタル等の分離現象は認められなかった。

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

調査名	ベース	流動化後	
	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)
W80-G30	19.2	48.3	3.6
W80-G32	17.8	48.8	3.5
W75-G28	17.6	46.0	4.7
W75-G30	16.6	46.0	4.2
W75-G32	17.0	46.5	3.1
W75-G34	18.6	49.3	2.6
W70-G28	14.2	47.8	4.8
W70-G30	14.6	46.0	3.8
W70-G32	17.0	45.8	3.2
W70-G34	17.2	45.3	2.5
W65-G30	10.3	45.8	4.2
W65-G32	15.8	44.5	3.5
W65-G34	14.0	46.0	3.5
W65-G36	13.9	44.0	2.6
W60-G32	14.0	44.0	4.4

表-5 砕砂を用いたコンクリートの試験結果

調査	AE減水剤 (C%)	流動化剤 (C%)	ベース	流動化後		
			スランブ (cm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	N/L値
W75-G30-C	0.30	0.90	12.4	50.5	5.6	1.06
W75-G32-C	0.30	0.80	16.5	55.0	6.0	1.02
W70-G32-C	0.30	1.00	10.0	49.0	6.8	0.97

2.4 分離低減剤の種類を検討

(1) 試験方法

良好なフレッシュ性状を示し単位水量を 175kg/m^3 とした W75-G30 (山砂) の調査を用い、2種類の分離低減剤の使用量を変化させたコンクリートについてブリーディング試験を行い、これらのマトリクスモルタルについて外円筒回転型回転粘度計 (容積 150cc 、ひずみ速度 $0\text{-}13\text{/s}$) によりレオロジー定数を測定した。分離低減剤 A の使用量は 20 、 30 、 60g/m^3 、分離低減剤 B は 90 、 180g/m^3 とした。ベースコンクリートの目標スランプは 15cm とし、流動化後の目標スランプフローは $45 \pm 5\text{cm}$ 、目標空気量は 4.5% とした。

(2) 試験結果

試験結果を表-6、図-4および図-5に示す。分離低減剤 A の使用量が増加すると、所定のスランプフローを得るための流動化剤量が増加し、ブリーディング量も増加している。これは流動化剤が多くなることにより凝結が遅延したためと考えられる。また、マトリクスモルタルの塑性粘度が同等であれば、分離低減剤 A より低粘度タイプの分離低減剤 B を用いた方がブリーディング量が低減している。なお、いずれのコンクリートも N/L 値は 0.9 以上で良好な間隙通過性を示し、材料分離も認められなかった。

2.5 まとめ

水セメント比 50% 、目標スランプフロー $45 \pm 5\text{cm}$ 、目標空気量 4.5% のコンクリートについて以下のことが明らかになった。

- ① 間隙通過性は粗骨材量に依存し、粗骨材量が 320g/m^3 以下で良好な間隙通過性が得られる。
- ② 流動化剤の使用量は、単位水量の減少または細骨材率の増大により増加する。

- ③ 低粘度タイプの分離低減剤を使用量を増やして用いることによりマトリクスモルタルのレオロジー定数を変化させずにブリーディング量の増加を抑制できる。

以上から良好な間隙通過性が得られる粗骨材量で、流動化剤の添加量の変動が比較的少ない W75-G32 の調査で、ブリーディング量が小さく抑えられた分離低減剤 B を用いたコンクリートについて硬化後の物性調査を行うこととした。

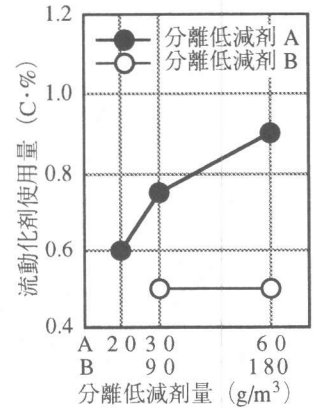


図-4 分離低減剤量と流動化剤量の関係

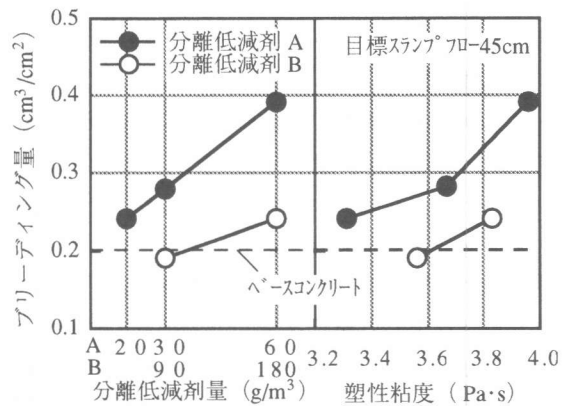


図-5 分離低減剤量および塑性粘度とブリーディング量の関係

表-6 コンクリートの試験結果

調査	流動化剤添加量 (C·%)	流動化後				モルタル	
		スランプフロー (cm)	空気量 (%)	N/L値	ブリーディング量 (cm³/cm²)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)
ベース	0	14.0*)	4.1	-	0.20	-	-
A-20	0.6	45.0	4.7	1.24	0.24	13.9	3.31
A-30	0.75	48.0	4.4	1.14	0.28	16.9	3.67
A-60	0.90	50.0	4.0	0.96	0.39	16.1	3.96
B-90	0.5	45.5	4.0	1.06	0.19	13.6	3.56
B-180	0.5	44.5	4.6	0.94	0.24	17.9	3.73

*) スランプを示した。

3. 硬化後の物性の検討

3.1 目的

高性能流動化コンクリートの硬化後の物性を明らかにすることを目的に各種強度および耐久性試験を調査し、検討を行った。

3.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（比重3.16）および高炉セメントB種（比重3.04）を用いた。使用骨材の試験成績を表-7に示す。混和剤は、AE減水剤、流動化剤および分離低減剤Bを用いた。

3.3 調査

コンクリートの調査を表-8に示す。普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いた高性能流動化コンクリート（FN、FB）に加え、比較用としてスランプ18cmの通常のコンクリート（N）について試験を行った。分離低減剤Bの使用量は180g/m³とし、流動化剤は目標スランプフローが得られるまで添加した。ベースコンクリートの目標スランプは15cmとし、流動化後の目標スランプフローは45±5cmとした。目標空気量はいずれも4.5±1.5%とした。

3.4 試験項目および方法

各種試験の項目および方法を表-9～表-11に示す。

3.5 試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-12に示す。いずれのコンクリートも目標のスランプ、スランプフローおよび空気量が得られた。ベースと流動化後では、空気量の大きな変化は認められなかった。

N/L値は、高性能流動化コンクリートではいずれも0.8以上を示したが、通常のコンクリートでは著しく小さくなった。ブリーディング量はベースと流動化後ではほぼ同等であった。

圧縮強度発現性状を図-6に示す。ベースと流動化後ではほぼ同様な強度発現性状を示した。強度試験結果を表-13に示す。いずれのセメントを用いた場合も材齢28日におけるヤング係数、曲

表-7 骨材の試験成績

	種類	産地	表乾比重	吸水率 (%)	実積率 (%)	洗い損失率 (%)	粗粒率
細骨材	山砂	鹿島	2.61	1.73	-	1.1	2.67
粗骨材	硬砂岩系碎石	奥多摩	2.66	0.633	58.0	0.16	6.45

表-8 コンクリートの調査

記号	セメント	W/C	細骨材率	単位	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	分離低減剤	流動化剤
FN	普通	50%	52.2%	l/m ³	175	111	349	320	0.325	180	0.37
				kg/m ³	175	350	911	851	C×%	g/m ³	C×%
FB	高炉B種	50%	51.9%	l/m ³	175	115	345	320	0.18	180	0.30
				kg/m ³	175	350	900	851	C×%	g/m ³	C×%
N	普通	50%	45.4%	l/m ³	175	111	304	365	0.30	0	0
				kg/m ³	175	350	793	971	C×%		

表-9 フレッシュコンクリートの試験項目

項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101による
スランプフロー	JIS A 1101に準ずる。
空気量	JIS A 1128による
コンクリート温度	温度計による
N/Lフロー試験	本文中で説明
ブリーディング試験	JIS A 1123による
凝結試験	JIS A 6204附属書1による

表-10 強度試験の項目

試験項目	試験方法	試験材齢
圧縮強度	JIS A 1108	3、7、28、91日
ヤング係数	土木学会基準	28日
ポアソン比	ASTM C 469-83	28日
引張強度(割裂)	JIS A 1113	28日
曲げ強度	JIS A 1106	28日

表-11 耐久性試験の項目

試験項目	試験方法または条件	測定時期
長さ変化試験	JIS A 1129	乾燥後 91日
凍結融解試験	JIS A 6204 (A法)	300 サイクル
促進中性化試験	前養生:28日間水中養生後 28日間20℃60%RH 促進条件:20℃60%RH、 CO ₂ 濃度5%	促進後 91日

表-12 フレッシュコンクリートの試験結果

コンクリートの種類	FN		FB		N	
	ベース	流動化	ベース	流動化		
スランプ (cm)	14.3	23.3	15.3	23.8	18.3	
スランプフロー (cm)	24.8	44.8	27.0	48.0	26.5	
空気量 (%)	4.2	4.6	4.1	4.8	4.5	
コンクリート温度 (°C)	22.3	22.0	21.5	21.3	23.0	
Lフロー値 (cm)	-	41.0	-	41.0	9.5	
Nフロー値 (cm)	-	38.5	-	48.0	2.0	
N/L値	-	0.94	-	1.17	0.21	
ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	0.25	0.29	0.17	0.19	0.29	
凝結試験 (hour-min)	始発	6-11	10-02	5-49	8-06	5-49
	終結	7-35	12-44	8-22	11-04	7-43

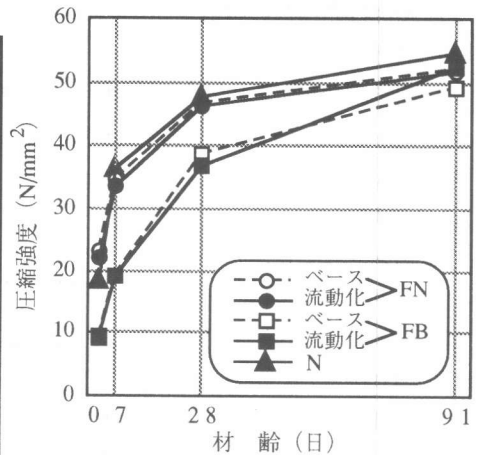


図-6 圧縮強度発現性状

げ強度および引張強度はベースと流動化後ではほぼ同等の値を示した。

耐久性試験結果を表-14に示す。長さ変化率は、ベースおよび流動化後で大きな差異は認められなかった。凍結融解300サイクル時の相対動弾性係数は、ベースおよび流動化後で大きな差異はなく高い値を維持していた。促進中性化試験では、ベースおよび流動化後とも中性化深さに大きな差異は認められず、中性化進行速度は同程度であるといえる。

3.6 まとめ

普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用した高性能流動化コンクリートの硬化後の物性はベースコンクリートとほぼ同等であることが確認できた。

4. 結論

ベースコンクリートに粉体流動化剤および粉体分離低減剤を後添加して製造した、スランプフロー45cm、空気量4.5%のコンクリートについて、水セメント比50%、単位水量175kg/m³、粗骨材量320g/m³の調合条件で良好な間隙通過性および分離抵抗性のコンクリートを得た。この製造方法および調合による普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いたコンクリートの硬化後の物性は、ベースコンクリートと同等であることを確認した。

(参考文献) [1] 米沢敏男ら：高強度コンクリートの品質管理を目的としたL型フロー試験法に関する研究、日本建築学会、学術講演梗概集、昭和63年、A-1, pp263-264、1988.10

表-13 強度試験結果 (材齢28日)

	FN		FB		N
	ベース	流動化後	ベース	流動化後	
圧縮強度 (N/mm ²)	46.6	46.4 (100)	38.7	37.0 (97)	47.8
ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	3.26	3.22 (99)	2.65	2.66 (100)	3.21
引張強度 (N/mm ²)	3.76	3.49 (93)	3.17	3.07 (97)	3.48
曲げ強度 (N/mm ²)	7.10	7.40 (104)	6.66	6.43 (97)	7.29

註) 表中の () 内の数値はベースコンクリートに対する百分率である。

表-14 耐久性試験結果

	FN		FB		N
	ベース	流動化後	ベース	流動化後	
長さ変化率 (μ) 91日	-610	-600 (98)	-690	-710 (103)	-600
相対動弾性係数 (%)	95	90 (95)	106	100 (94)	99
促進中性化深さ (mm) 91日	5.8	5.0 (86)	13.0	11.3 (87)	5.1

註) 表中の () 内の数値はベースコンクリートに対する百分率である。