

論文 粉末の流動化剤および増粘剤を用いた高性能流動化コンクリートのフレッシュ性状に関する実験的検討

太田 貴士*1・黒岩 秀介*2・野田 泰史*3

要旨：鉄筋コンクリート構造物の高密度配筋部や狭小部等において、コンクリートの施工性および品質の向上を図るため、現場で流動化剤および増粘剤を後添加することで容易に得られる中・高流動コンクリートが望まれている。本研究では粉末の流動化剤および増粘剤を用い、呼び強度 27~42、スランプ 18~21cm のベースコンクリートの調合条件が、流動化後のコンクリートの各種性状に及ぼす影響について実験的に検討した。その結果、調合条件によってスランプフロー目標値 45~55cm の流動性を、材料分離を生じることなく得られることが分かった。また、流動化後の圧縮強度および静弾性係数はベースコンクリートと同等であった。

キーワード：流動化剤, 増粘剤, 流動化コンクリート, 中流動コンクリート, 高流動コンクリート

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐震化や意匠性への寄与に伴い増加している高密度配筋部や狭小部等において、隅々までコンクリートを充填させるためには流動性の高いコンクリートを使用することが効果的である。建築分野における高流動コンクリートは、一般的に単位セメント量を増やして流動性と材料分離抵抗性を高めたものが多いため、建築物に要求されるコンクリート強度が高くない範囲においては、必要以上の単位セメント量やコンクリート強度を有する調合を用いなければならない場合が多い。また、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートの範囲外であり、国土交通大臣の認定を取得する必要がある。これらの要因によるコストアップや品質管理の煩雑さから、実際の工事で高流動コンクリートの採用が敬遠されることも見受けられ普及しづらい状況である。そこで、コンクリートの施工性および品質の向上を目的として、現場で流動化剤および増粘剤を後添加することで容易に得られ、十分な流動性と材料分離抵抗性を併せ持つ中・高流動コンクリートを対象に、ベースコンクリートの調合条件が流動化後のコンクリートの各種性状に及ぼす影響について実験的に検討した。

本研究における中・高流動コンクリートは、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートに適合する呼び強度 27~42、スランプ 18~21cm の普通コンクリートを現場で受入れ後、粉末流動化剤（以下、流動化剤）および粉末増粘剤（以下、増粘剤）を後添加することで得られる流動化コンクリートである。流動化後のスランプフロー目標値が 45~50cm（許容差±7.5cm）を中流動コンクリート、55~60cm（許容差±10cm）を高流動コンクリートと

し、検討を行った。なお、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(2015)」における流動化コンクリートのスランプは、調合管理強度 33N/mm²未満の場合は 21cm 以下、33N/mm²以上の場合は 23cm 以下としているが、本研究の流動化コンクリートでは、増粘剤を用いて材料分離抵抗性を高めているため、JASS 5 における流動化コンクリートよりもスランプを大きく設定している。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料を表-1 に示す。セメントは

表-1 コンクリートの使用材料

材料名	記号	種類・物性等
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 3.16g/cm ³
細骨材	S1	山砂, 表乾密度 2.61g/cm ³ , FM 2.48
	S2	石灰石砕砂, 表乾密度 2.65g/cm ³ , FM 2.92
	S3	山砂, 表乾密度 2.61g/cm ³ , FM 1.71
	S4	玄武岩砕砂, 表乾密度 2.81g/cm ³ , FM 3.00
粗骨材	G1	石灰石砕石 2005, 表乾密度 2.70g/cm ³ , FM 6.52
	G2	玄武岩砕石 1505, 表乾密度 2.82g/cm ³ , FM 6.50
	G3	玄武岩砕石 2010, 表乾密度 2.84g/cm ³ , FM 7.04
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 標準形, ポリカルボン酸エーテル系化合物
後添加剤	AD	粉末流動化剤, ポリカルボン酸エーテル系化合物
	V	粉末増粘剤, セルロース系化合物およびポリカルボン酸エーテル系化合物の混合

*1 大成建設 (株) 技術センター 研究員 工修 (正会員)

*2 大成建設 (株) 技術センター チームリーダー 博士 (工学) (正会員)

*3 ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ (株) 研究開発本部

表-2 ベースコンクリートの調合

調合 No.	呼び強度	ベーススランブ (cm)	流動化後目標スランブフロー (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位粗骨材絶対容積 (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)						添加量 (C×%)
								W	C	S1	S2	G1	SP	
1	27	18	45	56.5	4.5	47.4	363	170	301	430	430	980		0.25
2	30	18	50	53.0	4.5	44.3	381	170	321	398	398	1029		0.22
3	30	18	50	53.0	4.5	46.1	368	170	321	414	414	994		0.23
4	33	18	50	50.0	4.5	45.5	369	170	340	405	405	996		0.26
5	33	21	55	50.0	4.5	50.7	330	175	350	446	446	891		0.32
6	36	21	60	46.5	4.5	50.1	330	175	376	435	435	891		0.27
7	36	21	60	46.5	4.5	52.4	315	175	376	455	455	851		0.30
8	36	21	60	46.5	4.5	54.6	300	175	376	475	475	810		0.35
9	42	18	55	41.0	4.5	43.5	370	170	415	374	374	999		0.40
10	27	18	45	54.0	4.5	44.7	382	159	294	820	-	1050		0.80
11	30	18	50	51.0	4.5	44.1	389	160	314	801	-	1050		0.80
以下, 【S1, S2, G1】を【S3, S4, G2, G3】に変更。										S3	S4	G2	G3	
12	27	18	45	55.0	4.5	50.0	334	175	318	318	591	378	568	0.85
13	30	18	50	51.0	4.5	48.8	344	174	341	313	581	390	585	0.70
14	33	18	50	47.0	4.5	47.5	350	173	368	301	559	396	595	0.65

普通ポルトランドセメントを用い、細骨材は山砂 2 種類および砕砂 2 種類、粗骨材は砕石 3 種類を用いた。混和剤として高性能 AE 減水剤を、後添加剤としてポリカルボン酸エーテル系化合物の流動化剤と、セルロース系化合物およびポリカルボン酸エーテル系化合物を混合した増粘剤を用いた。新たな増粘剤を使用するにあたり、アルカリ水溶液中における増粘効果を確認するため、増粘剤の粘度の経時変化を測定した。測定は W/C=100% に調合したセメントスラリーの上澄み液を濾過した濾液中に、増粘剤を 2.0% 添加・攪拌し、B 型粘度計を用いて行った。各時間での測定は、25℃の室内で 60rpm で 1 分間攪拌した後に行った。粘度の経時変化を図-1 に示す。初期に粘度が上昇した後は経時による変化はほとんど無く、安定した増粘効果を確認した。

コンクリートの調合を表-2 に示す。呼び強度 27~42 に相当する水セメント比 (以下, W/C) のコンクリートで検討を行った。調合 No. (以下, No.) 1~11 および No.12~14 は、それぞれ東京近郊地域および関西地域のレディーミクストコンクリート工場で用いられている骨材および調合を想定した。ベースコンクリートのスランブは No.5~8 が 21cm, それ以外の調合では 18cm とした。細骨材率はベースコンクリートのスランブを得るために合わせたものを基本とした。ただし, No.2 は細骨材率を基本調合よりも低くした調合であり, No.6, 7, 8 は細骨材率を基本調合よりも高くした調合である。

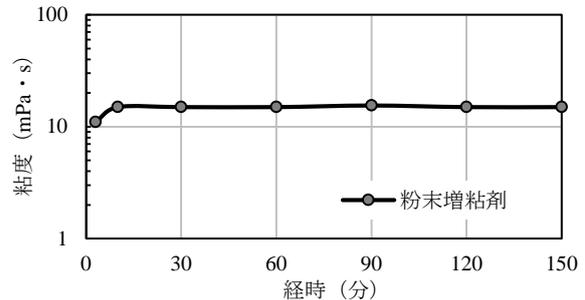


図-1 増粘剤の粘度の経時変化

表-3 試験項目

項目	試験方法	備考
スランブ	JIS A 1101	ベースコンクリートのみ
スランブフロー	JIS A 1150	
空気量	JIS A 1128	
練上がり温度	JIS A 1156	
J-Ring	ASTM C 1621 ²⁾	流動化後の一部のみ
Sieve segregation test	EN 12350-11 ⁴⁾	流動化後の一部のみ
圧縮強度	JIS A 1108	調合 No.3, 9 のみ
静弾性係数	JIS A 1149	調合 No.3, 9 のみ
乾燥収縮	JIS A 1129-3 附属書 A	調合 No.3 のみ
0 打フロー	JIS R 5201 (※打撃無し)	流動化後モルタルのみ
J ₁₄ 漏斗流下時間	JSCE-F 541	流動化後モルタルのみ

2.2 練混ぜおよび試験

コンクリートの練混ぜおよびフレッシュ性状試験は 20°C70%RH の恒温恒湿室で行った。練混ぜには水平 2 軸形強制練りミキサ（容量 60L）を用い、セメントと骨材を投入し 15 秒間空練りを行った後に、水と混和剤を投入し 60 秒間練混ぜを行い、ミキサ内の掻き落としを行った後さらに 60 秒間練り混ぜた。ベースコンクリートの空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ 、スランブが設定範囲（ $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、 $21 \pm 2.5\text{cm}$ ）となるように混和剤の添加量を調整した。ベースコンクリートの練混ぜ後にフレッシュ性状を確認し、ミキサ内にベースコンクリートを戻して流動化剤および増粘剤を添加し、120 秒間練り混ぜた。なお、ベースコンクリートの注水から流動化コンクリートの練上がりまでの時間は全てのバッチで 15 分程度であった。

コンクリートおよびモルタルの試験項目を表-3 に示す。ベースコンクリートの試験はスランブ、スランブフロー、空気量、練上がり温度、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮について行った。流動化コンクリートの試験は、全ての調合についてスランブフロー、空気量、練上がり温度を測定し、一部の調合について J-Ring、Sieve segregation test、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮を測定した。また、流動化コンクリートの一部の調合について、ウェットスクリーニングして採取したモルタルの 0 打フローおよび J_{14} 漏斗流下時間を測定した。0 打フローは、JIS R 5201 のフロー試験に従ってフローコーンを上方に取り去ったときに広がった直径を、フローテーブルに打撃を加えずに測定した。

J-Ring および Sieve segregation test の試験状況を写真-1 に示す。J-Ring 試験は ASTM C 1621-2014²⁾ に準じ、スランブコーンを正置する A 法により行った。試験はリング直径 300mm、バー本数 16 本、バー直径 16mm、バー間隔（芯々） $58.9 \pm 1.5\text{mm}$ の金属製装置を用い、J-Ring フロー、500mm フロー時間、スランブフローと J-Ring フローとの差（以下、ブロッキング）および PJ を測定した。J-Ring フローは一様な円形にフローしない場合も見受けられたため、広がり最大と思われる直径とその直交する方向の直径を測定した。なお、ブロッキングは ASTM において表-4 のように評価区分されている指標であり、PJ は EN12350-12 : 2010³⁾ において通過能力として式(1)で計算される指標である。これらは共に間隙通過性の指標として用いられる。コンクリートのフレッシュ性状によっては、同一の試料に対してそれぞれ異なる傾向の評価となる可能性を考慮し、本研究ではブロッキングおよび PJ の両方を測定し検討することとした。

$$PJ = (\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}) / 4 - \Delta h_0 \quad (1)$$

ここで、PJ : 通過能力(mm)、 Δh : 測定高さ(mm)、測定位置は図-2 に示す。



写真-1 J-Ring(左)および Sieve segregation(右) 試験状況

表-4 ブロッキング評価²⁾

ブロッキング	ブロッキング評価
0~25mm	明らかなブロッキングは無し
>25~50mm	わずかなものから顕著なブロッキング
>50mm	顕著なものから極端なブロッキング

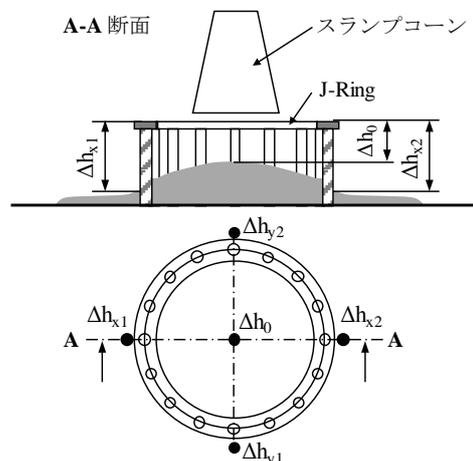


図-2 PJの計算に用いる Δh の測定位置³⁾

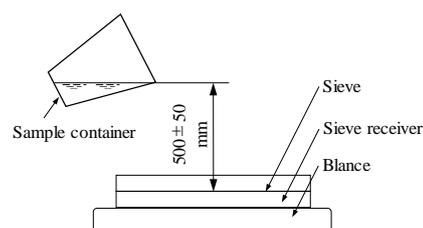


図-3 Sieve segregation test 概要⁴⁾

Sieve segregation test は EN 12350-11 : 2010⁴⁾ に準じて行った。試験概要を図-3 に示す。流動化後のコンクリートから試料 $4.8 \pm 0.2\text{kg}$ を採取してその質量 W_C を測定後、直径 300mm、高さ 60mm、目開き 5mm のふるいの上方 500mm の位置から、試料をふるいの中央部へ速やかに落下させた。ふるいの上で試料を 2 分間静置させた後、ふるいを通じた試料の質量 W_P を測定し、式(2)から材料分離抵抗性 SR(%) を求めた。

$$SR = (W_P / W_C) \times 100 \quad (2)$$

ここで、SR : 材料分離抵抗性(%), W_C : 採取した試料

表-5 フレッシュ性状試験結果 (調合 No. 2, 3, 5, 6)

ケース	調合 No.	添加量			ベースコンクリート			流動化コンクリート				
		SP (C×%)	AD (C×%)	V (kg/m ³)	空気量 (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	スランプフロー (cm)	50cm フロー時間 (秒)	フロー停止時間 (秒)	ベースに対するスランプフロー比
a	3	0.22	0.10	1.0	4.2	18.5	30.0	3.8	56.5	4.4	23.0	1.88
		0.22	0.125	1.0	4.5	19.0	28.5	4.3	59.0	2.9	23.2	2.07
b	4	0.23	0.125	1.0	5.2	20.0	31.0	4.5	55.0	5.3	16.3	1.77
		0.25	0.15	1.0	4.9	20.0	32.0	4.3	58.5	5.2	25.1	1.83
c	8	0.32	0.10	1.0	4.6	20.0	31.5	4.6	54.5	3.9	20.3	1.73
		0.32	0.15	1.0	5.1	21.0	33.5	4.2	61.5	4.1	24.0	1.84
d	9	0.27	0.10	1.0	3.9	18.5	27.5	4.3	51.0	9.9	13.7	1.85
		0.27	0.15	1.0	4.7	20.5	34.0	3.8	70.0	2.3	30.8	2.06
e	4	0.23	0.125	1.0	4.9	18.5	28.5	4.1	55.0	7.0	20.1	1.93
		0.23	0.125	2.0	5.2	19.0	29.0	5.2	56.5	6.5	29.0	1.95

表-6 流動化コンクリートの各種試験結果 (調合 No. 3, 6)

ケース	調合 No.	添加量			流動化コンクリート						ウェットスクリーニングモルタル			
		SP (C×%)	AD (C×%)	V (kg/m ³)	J-Ring フロー (cm)	J-Ring フロー時間		プロックキング (mm)	PJ (mm)	SR (%)	0打 フロー (mm)	0打 フロー時間		J ₁₄ 漏斗 流下時間 (秒)
						50cm (秒)	停止 (秒)					20cm (秒)	停止 (秒)	
d	6	0.27	0.10	1.0	45.5	-	21.4	55	44.4	1.8	135	-	14.0	31.7
		0.27	0.15	1.0	67.5	3.5	37.8	25	18.4	10.1	250	2.3	26.8	15.0
e	3	0.23	0.125	1.0	48.3	-	26.8	66	47.7	2.6	155	-	11.1	13.3
		0.23	0.125	2.0	51.5	28.8	36.5	51	43.9	2.6	215	6.6	13.0	23.7

の質量(g), W_P : ふるいを通過した試料の質量(g)。

材料分離抵抗性は 2 段階で評価し, SR1 (流動距離が 5m 以下で, 鋼材のあきが 80mm 以上の薄いスラブや鉛直部材) では 20% 以下, SR2 (流動距離が 5m 以上で流動時に材料分離に関する配慮が必要な場合, もしくは流動距離が 5m 以下であっても鋼材のあきが 80mm 以下の高い鉛直部材) では 15% 以下の場合に所要の材料分離抵抗性を有すると評価する⁵⁾。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状に及ぼす後添加剤の影響

No.2, 3, 5, 6 について, 流動化剤や増粘剤の添加量を変えたフレッシュ性状試験結果を表-5 に, No.3, 6 の流動化コンクリートの各種試験結果を表-6 に示す。ケース a~d では流動化剤の添加量を, ケース e では増粘剤の添加量を変えて検討を行った。なお, 練上がり温度は全てのバッチで 20~21℃ の範囲であった。ケース a~d における流動化剤添加量とスランプフロー比の関係を図-4 に示す。ケース a および b は, 同単位セメント量で

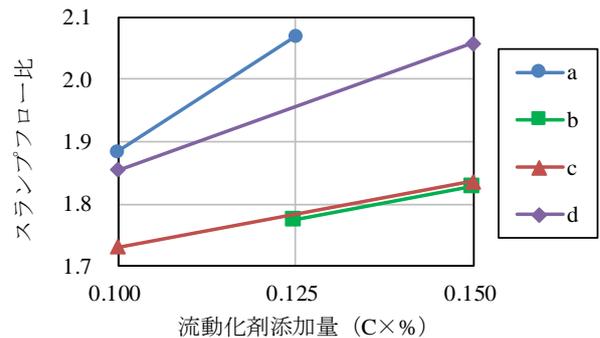


図-4 流動化剤添加量とスランプフロー比の関係

単位粗骨材量が異なる条件であり, これらと比較すると単位粗骨材量の多い a の方が, スランプフロー比およびその上昇勾配が大きくなった。また, ケース c および d は, 同単位水量および同単位粗骨材量で単位セメント量が異なる条件であり, これらと比較すると単位セメント量が多い d の方が, スランプフロー比およびその上昇勾配が大きくなった。ケース b および c はスランプフロー比の増加傾向がほぼ同一であった。これは, b は c より

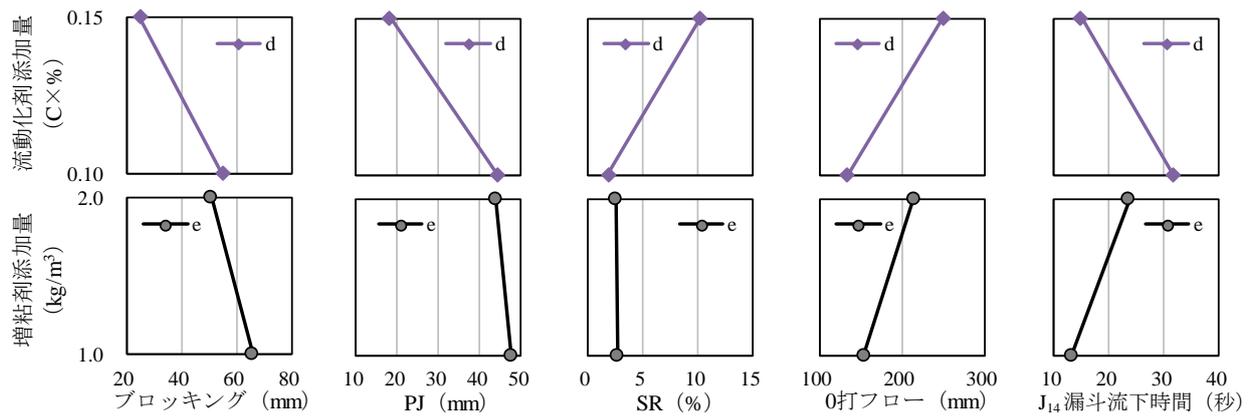


図-5 後添加剤の添加量と各種試験結果の関係

単位セメント量が少ないが単位粗骨材量が多いため、これらの要因が相互に影響したと考えられる。

流動化剤および増粘剤の添加量と各種試験結果の関係を図-5に示す。ケースdにおいて、流動化剤添加量の増加に伴い、ブロッキング、PJ、J₁₄漏斗流下時間は減少し、SRおよびモルタル0打フローは増大した。流動化剤により流動性および間隙通過性が高くなる一方で、材料分離抵抗性は低くなる傾向が認められた。ケースeにおいては、増粘剤添加量が1.0kg/m³から2.0kg/m³に増えた場合に、スランプフロー比およびSRは同等で、ブロッキングおよびPJは減少し、モルタル0打フローおよびJ₁₄漏斗流下時間は増大した。増粘剤の添加によりモルタルの粘性が高くなり、コンクリートの材料分離抵抗性、間隙通過性が高くなる傾向となった。

3.2 フレッシュ性状に及ぼす水セメント比の影響

調合条件による各種試験結果をまとめたものを図-6に示す。本研究で検討した調合では、目標スランプフロー(45±7.5cm, 50±7.5cm, 55±10cm, 60±10cm)を得るために要した流動化剤添加量は0.10~0.20%の範囲となった。流動化剤および増粘剤の後添加によって、材料分離を生じることなく呼び強度27~30(W/C=56.5~51.0%)のコンクリートで45~55cm程度、呼び強度33~42(W/C=50.0~41.0%)で50~60cm程度のスランプフローが得られた。No.6を除いた各調合ともスランプフロー試験後の目視観察では分離無しと判断されたが、ブロッキングは50mmを超えるものがほとんどであった。なお、ブロッキングの値は若林ら⁶⁾の水セメント比40~50%の試験結果と同程度の範囲であり、小泉ら⁷⁾はASTMにおけるブロッキングの評価基準では、増粘剤含有高性能AE減水剤を用いた高流動コンクリートの評価基準として適用するには厳しすぎる傾向にあるとしている。本研究における流動化コンクリートでも同様の傾向となり、軽微な締固めの併用などが必要であると考えられる。

No.3, 13は呼び強度30でそれぞれ使用骨材が異なる調合であり、流動化後スランプフローは50cm程度と同

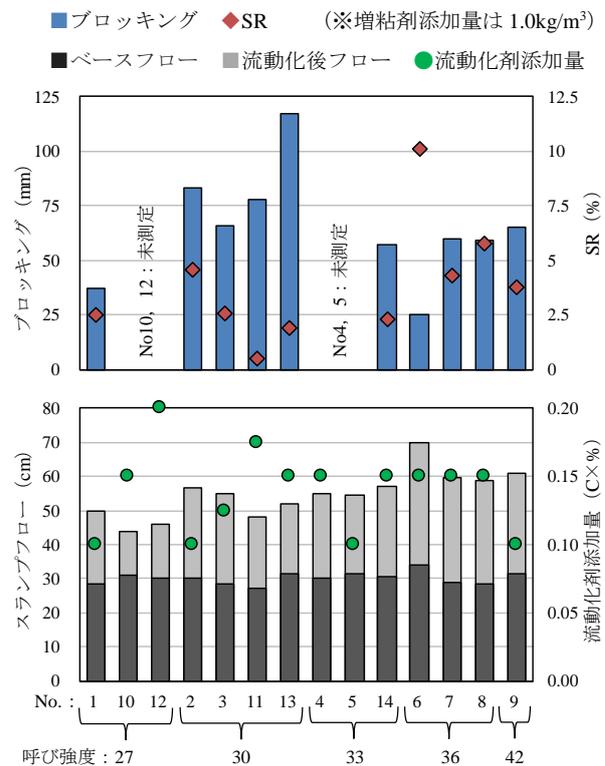


図-6 調合条件による各種試験結果

等であるがブロッキングはNo.13の方が大きくなった。同等の強度レベルおよびスランプフローであっても、骨材の種類により間隙通過性が異なることが分かった。

No.6, 7, 8は、呼び強度36のコンクリートについて、フロー55cm以上の高い流動性および間隙通過性を得ることを目的として、単位粗骨材量を少なくして検討を行ったものである。No.6のようにスランプフロー70cm(60±10cmの上限値)となった場合に、SRの値は10.8%と上述した評価指標SR1およびSR2において所要の材料分離抵抗性を有するとされるものであったが、スランプフロー試験後の目視観察では若干のペーストの染み出しが見られた。No.7, 8については60cm程度のスランプフローを得られ、目視観察およびSRの値から材料分離抵抗性を有すると判断した。呼び強度36(W/C=46.5%)の

コンクリートにおいては、細骨材率を調整することで、スランプフロー55±10cm程度の流動化コンクリートを得られると考えられる。

3.3 硬化コンクリートの試験結果

No.3, 9における圧縮強度および静弾性係数試験結果を図-7に、流動化前後の圧縮強度の関係を図-8に示す。流動化コンクリートの材齢28日圧縮強度は、ベースコンクリートと比べて-1.9~+4.6%と、増粘剤の添加量によらず流動化前後で同等となった。また、流動化コンクリートの静弾性係数は、ベースコンクリートと比べて+2.9~+6.9%と流動化前後で同等となった。

No.3の乾燥収縮測定結果を図-9に示す。基長測定後の乾燥期間28日までのにおいては、ベースコンクリートおよび増粘剤添加量1.0, 2.0kg/m³の流動化コンクリートの乾燥収縮ひずみの推移に大きな差は無く同程度となった。今後、乾燥期間182日までの乾燥収縮を測定する。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 粉末増粘剤の添加によりモルタルの粘性が高くなり、コンクリートの材料分離抵抗性、間隙通過性が高くなる傾向となった。
- (2) 目標のスランプフローを得るために要した粉末流動化剤の添加量は0.10~0.20%の範囲であった。
- (3) 粉末流動化剤および粉末増粘剤を後添加することで、材料分離を生じることなく呼び強度27~30(W/C=56.5~51.0%)のコンクリートで45~55cm程度、呼び強度33~42(W/C=50.0~41.0%)で50~60cm程度のスランプフローが得られた。
- (4) 呼び強度36(W/C=46.5%)の調合において、細骨材率を調整したうえで粉末流動化剤および粉末増粘剤を後添加することで、材料分離を生じることなくスランプフロー55±10cm程度の流動性を得られた。
- (5) 流動化コンクリートの圧縮強度および静弾性係数はベースコンクリートと同等であった。
- (6) 流動化コンクリートの乾燥期間28日までの乾燥収縮ひずみはベースコンクリートと同等であった。

参考文献

- 1) (例えば) 後藤和正, 渡辺健治, 戸堀悦雄, 細田高明: 高性能流動化コンクリートの開発研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.91-96, 1997
- 2) ASTM C 1621-2014 Standard test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring
- 3) BS EN 12350-12:2010 Testing fresh concrete Part 12: Self-compacting concrete - J-ring test
- 4) BS EN 12350-11:2010 Testing fresh concrete Part 11: Self-compacting concrete - Sieve segregation test

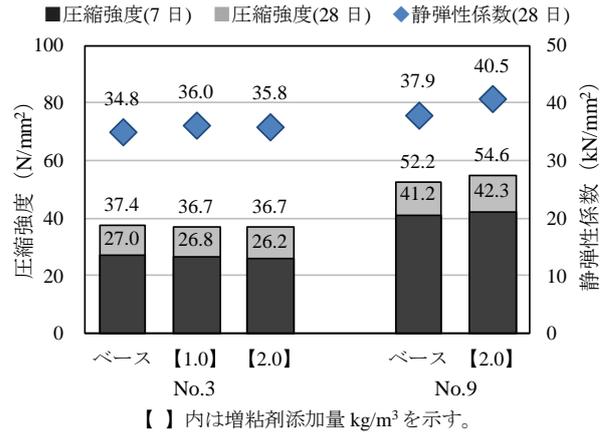


図-7 圧縮強度および静弾性係数試験結果

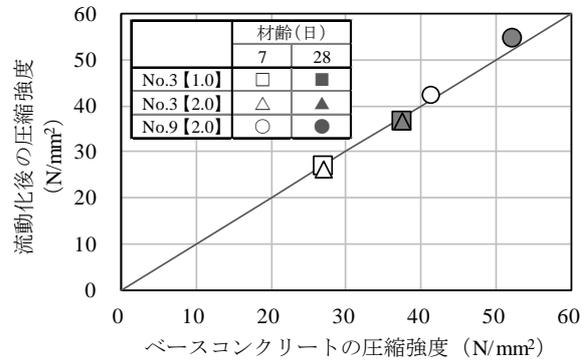


図-8 流動化前後の圧縮強度の関係

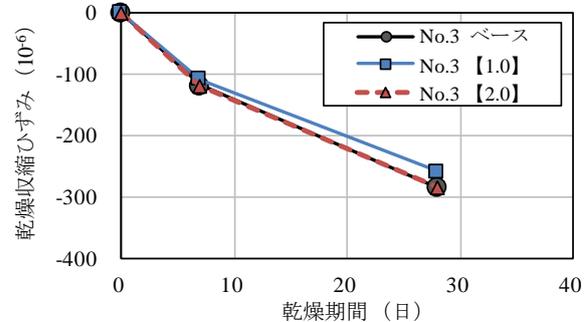


図-9 乾燥収縮測定結果

- 6) 桜井邦昭: 高流動コンクリートに求められる性能とその評価試験方法, コンクリート工学, Vol.53, No.8, pp.721-727, 2015.8
- 7) 若林和義ほか: 増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートのワーカビリティに関する基礎的検討 その3 J-Ring 試験における測定方法の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.523-524, 2016.8
- 8) 小泉信一ほか: 増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートのワーカビリティに関する基礎的検討 その5 J-Ring 試験方法の適用性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.527-528, 2016.8