

論文 粉末の流動化剤および増粘剤を用いた後添加型中流動コンクリートの実用化検討

太田 貴士*1・黒岩 秀介*2・野田 泰史*3・篠原 明*3

要旨：建設現場全般におけるコンクリートの施工性および品質の向上を目的として、普通強度領域でも汎用的に使用でき、粉末の流動化剤および増粘剤を用いて容易に得られる後添加型中流動コンクリートを開発した。本研究では室内実験および実大壁試験体の施工実験を行い、後添加型中流動コンクリートの各種性能を検証した。その結果、軽微な締固めによる型枠充填性を確認すると共に、水平方向および高さ方向における構造体コンクリート強度や骨材の分布に顕著な偏りは無く十分な材料分離抵抗性を持つことが分かった。また、後添加型中流動コンクリートを建築構造物へ実適用した事例についてまとめた。

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, 実大施工実験

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において、隅々までコンクリートを充填させ密実な躯体を構築するためには、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。これまで建築分野における高流動コンクリートは、結合材量を増やして流動性と材料分離抵抗性を高めたものが一般的であった。そのため、通常的设计基準強度の建築物においては必要以上の強度を有する調合を用いることになり、コストアップとなる場合が多かったが、現在では、増粘剤含有型の混和剤を用いて結合材量を多くすることなく流動性と材料分離抵抗性を高めた中・高流動コンクリートが実用化されてきている¹⁾。ただし、これらの中・高流動コンクリートも従来の高流動コンクリートと同様に、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取得に時間を要することから、特殊な案件以外での適用が見送られることも少なくない。そのため、現場で流動化剤や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スランブフロー仕様のコンクリートの普及が望まれている。そこで、筆者らは建設現場全般におけるコンクリートの施工性および品質の向上を目的として、普通強度領域でも汎用的に使用できる後添加型中流動コンクリートを開発した²⁾。本研究では、市中のレディーミクストコンクリート工場のコンクリートを用いた後添加型中流動コンクリートのフレッシュ性状を室内実験で確認後、実大壁試験体を用いた施工実験を行い、型枠充填性、材料分離抵抗性、構造体コンクリート強度等を検証した。その結果を踏まえ、後添加型中流動コンクリートを建築構造物へ実適用した事例についてまとめた。

本研究における後添加型中流動コンクリートは、JIS A 5308 の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、スランブ 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。流動化後のスランブフローの管理値は $45 \pm 7.5\text{cm}$ もしくは $50 \pm 7.5\text{cm}$ とし、締固めを要する中流動コンクリートとして使用した。

2. 室内実験

2.1 実験概要

コンクリートの使用材料を表-1 に、ベースコンクリートの調合を表-2 に示す。後添加剤を除く各材料は、本実験を行ったレディーミクストコンクリート工場（以下、工場）で通常使用しているものである。増粘剤はアルカリ水溶液中において安定した増粘効果を持つもの²⁾を使用した。ベースコンクリートは JIS A 5308 に適合するスランブ 18cm、空気量 4.5% の呼び強度 27 および 30 のコンクリートとし、流動化後の目標スランブフローは $45 \pm 7.5\text{cm}$ とした。練混ぜには水平 2 軸形強制練りミキサーを用いた。フレッシュ性状を確認したベースコンクリートをミキサー内に戻して流動化剤および増粘剤を添加し 60 秒間練り混ぜた。流動化前後のフレッシュコンクリートについてスランブ、スランブフロー、空気量、コンクリート温度を、硬化コンクリートについて圧縮強度を測定した。また、事前の実験結果^{2),3)}から、流動化剤および増粘剤の添加量は 235g/m^3 および 1000g/m^3 を基本とし、流動化剤添加量とフロー増加量の関係を把握するために添加量を増やした調合についても試験を行った。

*1 大成建設（株） 技術センター 研究員 修士（工学）（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

2.2 実験結果および考察

フレッシュ性状および圧縮強度試験結果を表-3 に示す。いずれの呼び強度も基本添加量でスランプフロー50cm程度が得られ、目視観察で材料分離無しと判断できる性状であった。また、流動化剤の添加量を基本の1.5倍まで増やした場合に、基本添加量におけるスランプフローからの増大量は比較的小さかった。これらの結果から、呼び強度27や30程度でベーススランプ18cmの細骨材率をそのまま用いる今回の中流動コンクリートでは、上述した基本添加量が適切だと判断した。後述する実大施工実験によって、基本添加量とした中流動コンクリートの型枠充填性や材料分離抵抗性等を確認すると共に、強制練りミキサとアジテータ車の攪拌効率の違いによるフレッシュ性状への影響を把握することとした。また、流動化後の空気量は0.3~1.0%程度減少する傾向であり、流動化前後の圧縮強度は流動化剤の添加量によらず同等であった。

3. 実大施工実験

3.1 実験概要

実大施工実験に用いたコンクリートの使用材料および調合は前章と同様であり、工場で製造したコンクリートをアジテータ車によって実験場所へ運搬した。試験項目を表-4 に示す。フレッシュコンクリートの試験は、スランプ、スランプフロー、空気量、コンクリート温度について行い、施工実験時に流動勾配を測定した。硬化コンクリートについては、実大試験体から採取したコア供試体(φ100×200mm)を用いて圧縮強度、静弾性係数、粗骨材面積率を測定した。なお、粗骨材面積率は、採取コアの両端面を除く側面について、全体面積に対する粗骨材部分の面積の割合として算出した。また、フレッシュ試験時に作製した供試体を用いて圧縮強度試験を実施し、調合No.2については凍結融解試験および促進中性化試験を実施した。

実大試験体の概要を図-1に、実大試験体の型枠状況を写真-1に示す。試験体は開口部を有する壁付き柱であり、断面600mm×600mm、高さ3000mmの柱と、中央部に1000×1500mmの開口部を有する長さ5000mm、高さ3000mm、壁厚200mmの壁が一体となった形状とした。柱の配筋は、主筋8-D22、帯筋D13-□-@100とし、壁の配筋はD13-@150ダブルとした。開口部周りの十分な補強として、隅角部に2-D13ダブルの斜め補強筋を、開口部左右に5-D13ダブルの鉛直補強筋を、開口部上下に3-D13ダブルの水平補強筋を配筋した。なお、図中の丸印は硬化コンクリートの試験に用いたコア採取位置を示している。また、コンクリートの流動状況を確認するため、壁型枠の一部にアクリル板による透明型枠を用いた。

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	S	混合砂、表乾密度2.62g/cm ³ 、FM 2.50
粗骨材	G1	硬質砂岩碎石、表乾密度2.65g/cm ³ 、実積率60.0%
	G2	安山岩碎石、表乾密度2.62g/cm ³ 、実積率60.0%
	G3	石灰石碎石、表乾密度2.70g/cm ³ 、実積率60.0%
混和剤	SP	高性能AE減水剤、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

表-2 ベースコンクリートの調合

調合No.	呼び強度	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
				W	C	S	G1	G2	G3	SP
1	27	54.1	49.3	170	315	886	368	275	281	3.31
2	30	51.5	48.9	170	330	872	368	275	281	3.47
3	30	53.5	49.2	170	318	883	368	275	281	3.18

(共通事項) ベーススランプ 18cm、流動化後スランプフロー 45cm、空気量 4.5%、単位細骨材絶対容積 348L/m³

表-3 フレッシュ性状および圧縮強度試験結果

調合No.	分類	添加量 (g/m ³)		コンクリート温度 (°C)	空気量 (%)	スランプ [スランプフロー] (cm)	50cmフロー [フロー停止時間] (秒)	標準養生材齢28日圧縮強度 (N/mm ²)
		AD	V					
1	ベース	-	-	23	5.0	20.0 [33.0]	- [-]	36.4
	流動化	235	1000	23	4.3	23.5 [50.0]	- [17.1]	37.0
	流動化	353	1000	23	4.0	23.5 [50.5]	- [18.4]	36.6
2	ベース	-	-	23	5.4	20.0 [30.5]	- [-]	39.7
	流動化	235	1000	23	5.1	24.0 [53.0]	7.8 [18.6]	40.3
	流動化	353	1000	23	4.5	24.0 [54.5]	6.7 [20.5]	39.5

表-4 試験項目

項目	試験方法
スランプ / スランプフロー	JIS A 1101 / JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
コンクリート流動勾配	透明型枠部の打上がり高さをマキング
圧縮強度	JIS A 1108
静弾性係数	JIS A 1149
粗骨材面積率	採取コア表面における面積を測定
凍結融解試験	JIS A 1148
促進中性化試験	JIS A 1153

3.2 施工および試験方法

実大試験体の施工実験を行う2週間前に、実大試験体の転倒防止のための基礎の打込みを行った。打込みには、呼び強度27(調査No.1)のベースコンクリートに流動化剤および増粘剤を後添加し、2分間の高速攪拌を行って得た中流動コンクリートを用い、アジテータ車内での低速攪拌環境下および静置状態におけるフレッシュ性状の経時変化を測定した。

実大試験体の施工実験には、呼び強度30(調査No.2)のベースコンクリートに流動化剤および増粘剤を後添加し、2分間の高速攪拌を行って得た中流動コンクリートを用いた。上述した基礎の打込みの際に、流動化後のフロー増大量が室内実験時よりも小さくなる傾向が見られたため、流動化剤の添加量は増加させた。はじめに、図-1に示す筒先位置①からポンプ車の筒先を降ろしてコンクリートを約0.7m³打込み、透明型枠部分のコンクリートの打上がり高さをマーキングして流動勾配を測定した。その後、振動機挿入位置a, b, c, d, e, hの6箇所について、aから順に1箇所ずつ棒形振動機を挿入して締固めを行い、6箇所の締固めを終えた後に透明型枠部分のコンクリートの打上がり高さをマーキングして流動勾配を測定した。なお、1箇所の加振時間は、JASS 5⁴⁾において一般的な加振時間とされる5~15秒の下限である5秒とした。流動勾配の測定後は、引き続き筒先位置①からコンクリートを打込みつつ、振動機挿入位置a~jで1回5秒間の締固めを適宜行った。柱のおよそ2/3の高さまでコンクリートが打ち上がった後に筒先を筒先位置②に移動し、コンクリートを打込みながら同様の締固めを行い、開口上部に達する高さまでコンクリートを打ち上げた。その後、筒先位置③, ④, ⑤, ⑥の順で同様の打込みおよび締固めを行い、試験体の天端までコンクリートを打ち上げて終了した。なお、打込み中は型枠側面を木槌で適宜叩く締固めも行った。また、上記の施工と並行して、アジテータ車内での低速攪拌環境下および静置状態におけるフレッシュ性状の経時変化を測定した。

コンクリートの硬化後、材齢27日で図-1に示す所定の位置からφ100×200mmのコア供試体を7セット×3本の合計21本採取し、各セットのうち1本について粗骨材面積率を測定した。材齢28日にコア供試体21本について圧縮強度および静弾性係数を測定し、各セット3本の平均値を算出した。

3.3 実験結果および考察

フレッシュ性状試験結果を表-5に、フレッシュコンクリートの経時変化試験結果を図-2に示す。各車とも流動化後のスランプフローおよび空気量は管理値の許容範囲内であり、目視観察で材料分離無しと判断した。前章の室内実験と同程度のベーススランプおよび流動化剤

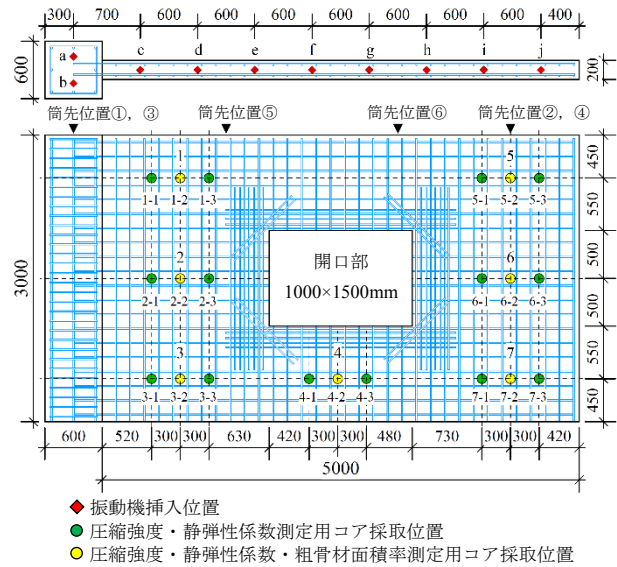


図-1 実大試験体概要



写真-1 実大試験体型枠状況

表-5 フレッシュ性状試験結果(実大施工実験)

調査No.	コンクリート積載量(m ³)	分類	添加量(g/m ³)		コンクリート温度(°C)	空気量(%)	スランプ[スランプフロー](cm)	フロー停止時間(秒)
			AD	V				
1	1.50	ベース	-	-	31	3.2	19.5 [32.0]	-
		流動化	235	1000	31	5.0	22.5 [42.0]	3.2
1	3.00	ベース	-	-	29	4.3	19.5 [30.5]	-
		流動化	235	1000	30	5.0	22.0 [41.0]	6.3
2	4.25	ベース	-	-	31	5.7	20.5 [35.5]	-
		流動化	290	1000	31	5.8	24.5 [51.0]	10.9

添加量であるにもかかわらず、流動化後のスランプフロー増大量は小さくなった。これは後添加後の攪拌効率の違いによるものと考えられる。また、流動化直後の空気量は室内実験とは異なり増加する傾向にあった。これは

アジテータ車による高速攪拌の際、フレッシュコンクリート中に空気が巻き込まれたためだと考えられ、積載量が少ない場合にその傾向がより大きくなった。

スランブフローおよび空気量の経時による減少傾向は、静置状態よりも低速攪拌環境下の方が緩やかであった。また、呼び強度や流動化直後のスランブフロー値に相違はあるものの、後添加時期が遅くなった場合においても流動化後のスランブプロスの傾きが大きくなる傾向は見られなかった。そのため、実工事の際は可能な限り打込み開始に近い時期に後添加を行うことで、打込み時のスランブプロスの影響を最小限にできると考えられる。

流動勾配の測定結果を図-3に、脱型後の試験体状況を写真-2に示す。透明型枠に挟まれた通常の型枠部の流動勾配については、透明型枠部のマーキング端を直線でつなぎ、流動勾配の両端部は透明型枠部のマーキングから算出した勾配を用いて外挿した。締固め前後の流動勾配はそれぞれ23.8%および21.7%であった。比較的軽微だと考えられる締固めを行った結果、コンクリートの流動勾配を大きく変えることは無かったものの、脱型後の試験体には開口部周りを含めて充填不良や砂すじは無く、開口部下面に目立つ気泡跡は無かったこと等から、中流動コンクリートの良好な型枠充填性が確認された。

コア供試体による圧縮強度、静弾性係数、粗骨材面積率の測定結果を表-6に、各試験値と高さおよび水平距離の関係を図-4示す。なお、圧縮強度および静弾性係数は3本の供試体の平均値を示しており、表中[]内の数値は各試験項目の変動係数である。試験体底面からの高さ450mmにおける柱中心(筒先位置①)からの各水平距離の結果を見ると、圧縮強度、静弾性係数、粗骨材面積率ともに水平距離の長短に伴う明確な増減傾向は無く、打込みおよび締固めによるコンクリートの水平流動による材料分離や骨材の偏りは無かったものと考えられる。高さ方向では、上部で粗骨材面積率が低くなる傾向となった。その影響を受けて静弾性係数も上部が若干低くなる傾向が見られたが、高さ方向の差は小さかった。圧縮強度は上部が若干高くなる傾向も見られたが、静弾性係数と同様に高さ方向の差は小さかった。高さ方向の各試験値の分布については、既往の報告⁵⁾⁶⁾における分布の幅と同様の傾向であり、顕著な材料分離を示す値では無いことから、本研究で用いた中流動コンクリートが十分な材料分離抵抗性を持つことが確認された。

以上の結果から、開口部に十分な補強配筋を施した壁付き柱部材においても、本研究の後添加型中流動コンクリートのように細骨材率補正をしていないスランブフロー45cmのコンクリートで、軽微な締固めにより材料分離を生じることなく良好な型枠充填性を得られることを確認した。

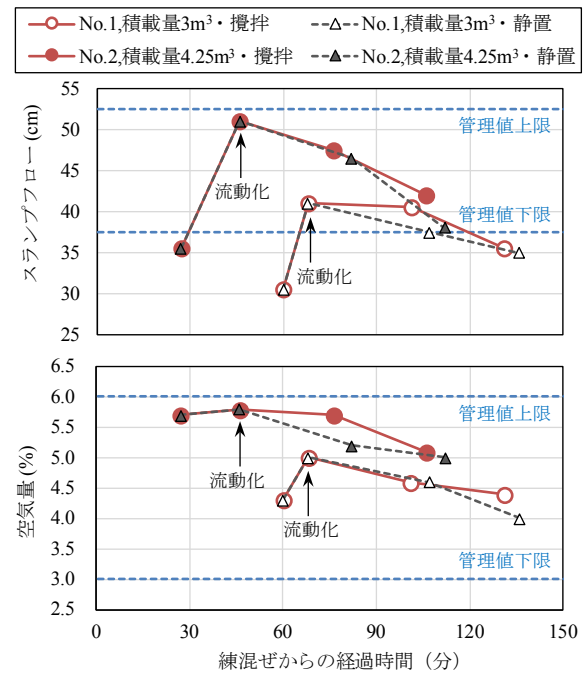


図-2 フレッシュコンクリートの経時変化試験結果

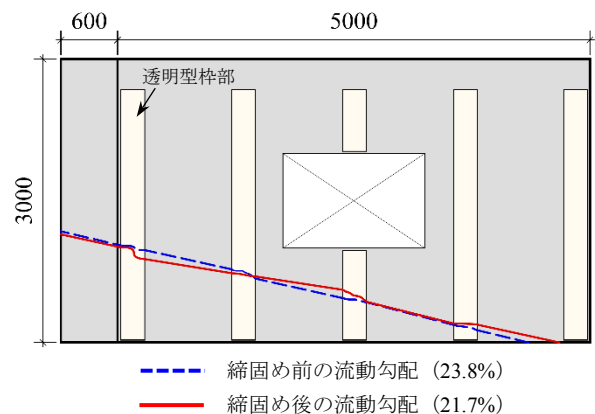


図-3 コンクリートの流動勾配測定結果

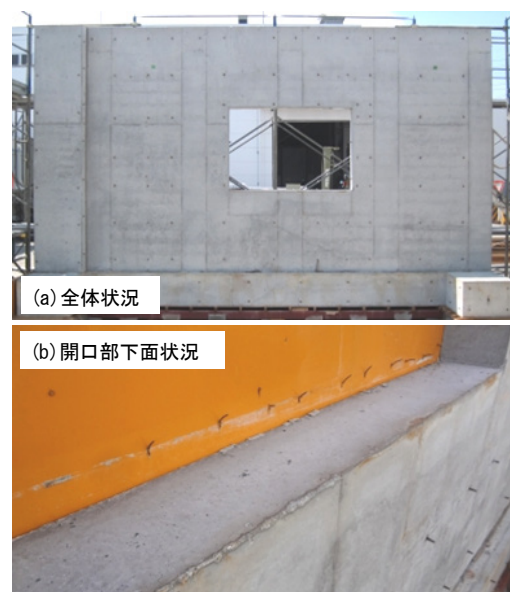


写真-2 脱型後の試験体状況

表-6 圧縮強度、静弾性係数、粗骨材面積率測定結果（コア供試体）

		平均圧縮強度 (N/mm ²)			平均静弾性係数 (kN/mm ²)			粗骨材面積率 (%)		
試験体 底面 からの 高さ (mm)	2550	35.9 [3.9]	-	37.8 [5.2]	27.1 [4.6]	-	27.5 [7.5]	29.2	-	28.6
	1500	34.7 [7.2]	-	37.0 [3.7]	28.4 [1.6]	-	28.6 [4.2]	30.6	-	35.0
	450	35.3 [3.7]	34.6 [5.9]	35.0 [2.8]	29.6 [2.4]	28.5 [4.1]	28.8 [3.4]	35.2	32.0	33.6
[] 内は 変動係数(%)		1120	2770	4580	1120	2770	4580	1120	2770	4580
		柱中心からの水平距離 (mm)								

※標準養生供試体の材齢 28 日圧縮強度：ベース 37.9N/mm²，流動化後 37.8N/mm²

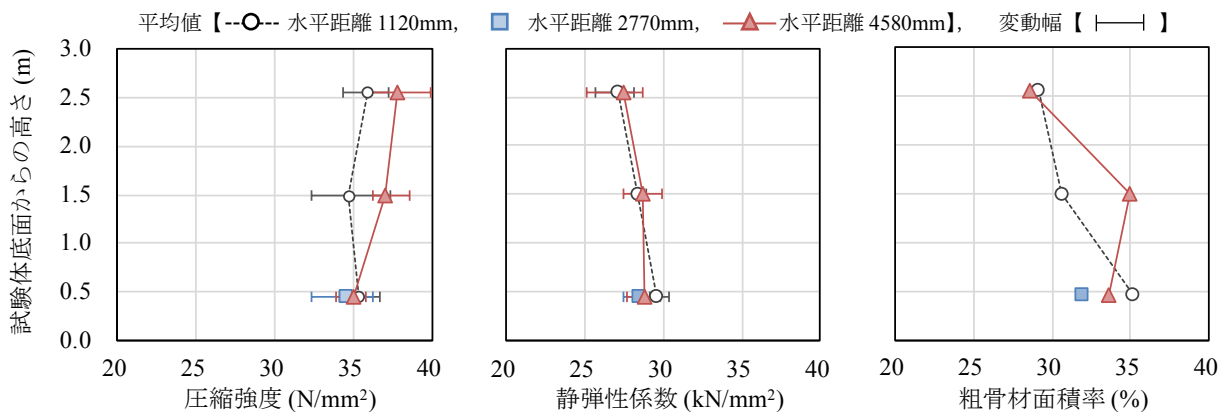


図-4 各試験値と高さおよび水平距離の関係

凍結融解試験および促進中性化試験結果を表-7 に示す。流動化前後のコンクリートについて、凍結融解試験における耐久性指数および質量減少率，促進期間 13 週までににおける中性化深さは同等であった。

4. 建物への適用

4.1 適用建物の概要

適用した建物は，地下 2 階，地上 3 階，軒高 17.989m の研究施設であり，一部に既存の躯体を利用する改築工事において，躯体となる新設壁，増打ち壁，増打ち柱等に総量約 300m³ の後添加型中流動コンクリートを適用した。適用部位の一例を表-8 に示す。

4.2 コンクリートのフレッシュ性状および適用状況

ベースコンクリートは表-1 に示す材料を用いた表-2 に示す調合 No.3 の呼び強度 30，スランプ 18cm の調合である。なお，前章から適用時期が変わったため，調合 No.2 から調合 No.3 に変更している。工場で製造したベースコンクリートを現場で受け入れてフレッシュ性状試験を行った後，流動化剤および増粘剤をアジテータ車に投入し，2 分間の高速攪拌直後に流動化コンクリートの試料を採取してフレッシュ性状試験を行った。打込み日数 9 日間，アジテータ車 36 車の流動化前後について試験を実施した。流動化剤および増粘剤の添加量は，フレッ

表-7 凍結融解試験および促進中性化試験結果

試験対象	凍結融解試験(300 サイクル)		促進期間 13 週 中性化深さ (mm)
	耐久性指数(DF)	質量減少率(%)	
ベース	94	3.0	13.0
流動化	94	3.1	13.6

表-8 適用部位例

種類	高さ(mm)	断面(mm)	配筋要領
新設壁	3000	5200×180	D10+D13-@200 ダブル
	6200	7500×250	D13-@200 ダブル
増打ち壁	6200	5200×300	D16-@150 ダブル
増打ち柱	6200	500×300	主筋 6-D22 帯筋 D-10-□-@100

シュコンクリート 1m³あたりそれぞれ 1 袋 (235g) および 2 袋 (1000g) を基本とし，積載量によって生じ得る小数点以下の袋数については切り捨てとした。ただし，ベースコンクリートのフレッシュ性状や外気温等に応じて，流動化剤の添加量のみを 4m³あたり 1~2 袋増減させた。また，流動化後の流動性が不足していると判断された場合は，流動化剤を 1~2 袋再添加してスランプフローの調整を行った。

適用時のフレッシュ性状試験結果を表-9 に，フレッ

シュコンクリートの積載量4および4.25m³における流動化直後の空気量とコンクリート温度の関係を図-5に示す。ベースコンクリートのスランプは管理値 18±2.5cm に対して平均 19.0cm, 変動係数 6.3%であり, 流動化後のスランプフローは管理値 45±7.5cm に対して平均 43.1cm, 変動係数 9.5%であった。空気量は流動化後に概ね増加する傾向となった。実大施工実験時と同様に後添加後の高速攪拌に伴う巻き込み空気によるものと考えられる。実大施工実験時に, フレッシュコンクリートの積載量が少ないと空気量の増大量が大きくなる傾向を確認したが, 同程度の積載量の場合はコンクリート温度が低いと空気量の増大量が若干大きくなる傾向が見られた。温度による後添加型中流動コンクリートのフレッシュ性状への影響については, 今回の実適用時の温度範囲よりもさらに低温度および高温の場合も含め, 今後もデータを蓄積し引き続き検討を進めていく。

中流動コンクリートの適用状況を写真-3に示す。コンクリート打込み時には, 棒形振動機による締固めおよび木槌を用いた型枠側面の叩きによる締固めを行った。高さ 6200mm の柱や壁, 開口部を有する壁等について, 脱型後の部材表面に充填不良は見受けられず, 中流動コンクリートの良好な型枠充填性が確認された。

5. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 攪拌方法の違いにより流動化後のフレッシュ性状の傾向は異なり, 小型ミキサと比べてアジテータ車での攪拌ではスランプフロー増大量は小さく, 空気量は大きくなる傾向となった。
- (2) 流動化直後の空気量はアジテータ車による攪拌時の巻き込み空気によって概ね増大し, その増大量は積載量が少ない場合やコンクリート温度が低い場合に若干大きくなる傾向であった。
- (3) 細骨材率補正をしていないスランプフロー45cmの中流動コンクリートでも, 軽微な締固めにより良好な型枠充填性を得られることを確認した。
- (4) 打込みおよび締固めを行った中流動コンクリートについて, 水平方向および高さ方向における構造体コンクリート強度や骨材の分布に顕著な偏りは無く十分な材料分離抵抗性を持つことが分かった。

参考文献

- 1) 小泉信一: 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現状 -スマートダイナミックコンクリート(SDC)の概要と適用拡大に向けた取り組み-, GBRC, Vol.42, No.1, pp.2-10, 2017.1
- 2) 太田貴士, 黒岩秀介, 野田泰史: 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

表-9 適用時のフレッシュ性状試験結果

分類	空気量			スランプ			スランプフロー		
	平均値 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)	平均値 (cm)	標準偏差 (cm)	変動係数 (%)	平均値 (cm)	標準偏差 (cm)	変動係数 (%)
ベース	4.5	0.51	11.4	19.0	1.23	6.5	31.4	2.80	8.9
流動化	5.2	0.63	12.1	22.6	0.87	3.9	43.3	4.03	9.3

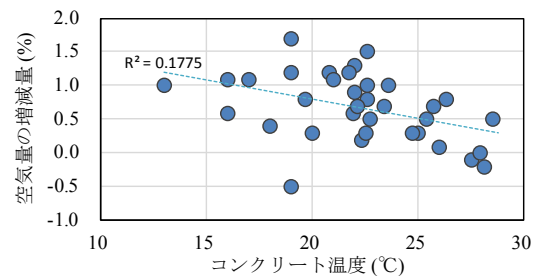


図-5 流動化直後の空気量とコンクリート温度の関係 (フレッシュコンクリートの積載量 4 および 4.25m³)



写真-3 適用状況

- 3) 太田貴士, 黒岩秀介: 粉末流動化剤および粉末増粘剤を用いた高性能流動化コンクリートに関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.341-342, 2017.8
- 4) 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
- 5) 高見錦一, 千々岩伸佐久, 岩竹秀昭, 元木亮, 福島和将, 岸繁樹: コンクリートポンプ工法における施工性改善に関する提案 その 8 コア供試体試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.625-626, 2012.9
- 6) 本田亮, 菅谷泰之, 阿合延明: 増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を用いた低粘性高流動コンクリートの実大施工実験における柱・壁部材への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.529-530, 2016.8