

論文 増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートの諸性状に関する研究

古川 雄太*1・大岡 督尚*2・五十嵐 浩行*3・阿合 延明*4

要旨: 本報は、増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートの諸性状について検討を行ったものである。その結果、練上がり後 120 分間に渡り目標とするフレッシュ性状を有しており、流動性が低下したものは、増粘剤を含まない混和剤の後添加により、材料分離することなく流動性を回復させることが可能であった。力学性状および耐久性状は、通常のコンクリートと同等であり、構造体強度補正值は JASS5-2009 に示されている標準値と同等であった。また、ポンプ圧送によるスランプフローの低下はあるが、閉塞することなく圧送が可能であった。以上より、構造体用コンクリートとしての性能を有していることを確認した。

キーワード: 高流動コンクリート, 増粘剤, 低粘性, ポンプ圧送性, 構造体強度補正值

1. はじめに

近年、過密配筋や意匠的に複雑な部位に対して、充填性の向上や施工の省力化を目的に高流動コンクリートの適用が検討されるものの、建築分野においては国土交通大臣認定の必要性やコンクリートの単価が高くなることを理由に、採用されない事例が多いのが現状である。しかしながら、今後の建設現場での熟練工の不足や災害時の迅速施工に対応するためには、高流動コンクリートを採用することが一つの解決策であると考えられている¹⁾。

高流動コンクリートは、高い材料分離抵抗性が求められることから、建築分野においては粉体量が多い高強度コンクリートの流動性を高めたコンクリートを高流動コンクリート(粉体系高流動コンクリート)として用いることが多い。しかしながら、この粉体系高流動コンクリートは、材料分離の観点からは良好ではあるが、必要なコンクリート強度が低い範囲では、必要以上のセメント量を要し、過剰なコンクリート強度(コストアップ)になることが問題として挙げられる。そのため、粉体量(セメント量)を増やすことなく材料分離抵抗性を上げた増粘剤系高流動コンクリートの研究も数多くなされてきたが²⁾、従来の増粘剤の添加は、ミキサへの手投入やミキサの洗浄等の必要性があり、市中のレディーミクストコンクリート工場での製造は容易ではなく、普及に至っていないのが現状である。

一方で、近年、高性能 AE 減水剤と増粘剤を一液化し、過度な粘性を有しない高性能 AE 減水剤が開発されたことにより、増粘剤系高流動コンクリートが市中の生コン工場で容易に製造が可能となった³⁾。そこで、本研究では国土交通大臣認定取得を目的に、増粘剤一液型高性能

AE 減水剤を用いた高流動コンクリートの諸性状について検討を行った。

2. 実験計画

本研究は、3つの実験で構成されている。実験1では、高流動コンクリートの基礎物性の把握を行うため、室内試験により、フレッシュ性状、力学性状および耐久性状の検討を行った。実験2では、実機試験による高流動コンクリートのフレッシュ性状および力学性状の検討を行った。実験3では、増粘剤を含まない混和剤の後添加による流動性の回復と、ポンプ圧送性の評価として、圧送負荷を高めて圧送し、圧送前後の性状確認を行った。

実験に使用した材料を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、各材料はレディーミクストコンクリート工場(以下、本工場と略記)の通常使用品を使用した。

表-1 使用材料

材料名	種類・物性値等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント, ρ :3.16g/cm ³
細骨材 (S)	山砂(80%), ρ :2.64 g/cm ³ , Q:1.62%, FM:2.50 砕砂(20%), ρ :2.65 g/cm ³ , Q:1.18%, FM:3.00
粗骨材 (G)	石灰岩碎石(50%), ρ :2.70 g/cm ³ , Q:0.57%, FM:6.64 砂岩碎石(50%), ρ :2.66 g/cm ³ , Q:0.59%, FM:6.56
練混ぜ水 (W)	上水道水(室内試験) 地下水(実機試験)
混和剤 (Ad)	(Ad1)増粘剤一液型高性能 AE 減水剤, ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体 (Ad2)高性能 AE 減水剤, ポリカルボン酸エーテル系 (Ad3)流動化剤, 特殊ヒドロキシポリカルボン酸化合物

ρ :密度(骨材は表乾密度), Q:吸水率, FM:粗粒率

*1 東急建設株式会社 技術研究所 修士(工学) (正会員)
 *2 東急建設株式会社 技術研究所 博士(工学) (正会員)
 *3 関東宇部コンクリート工業株式会社 技術センター (正会員)
 *4 BASF ジャパン株式会社 技術開発センター (正会員)

3. 実験 1 室内試験

3.1 概要(実験 1)

コンクリートの調合を表-2に示す。呼び強度 27, 36 および 45 に相当する水セメント比のコンクリートで検討を行った。目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とし、目標スランプは比較用のコンクリートで $21 \pm 2\text{cm}$ 、高流動コンクリートは 27N-F をスランプフローで $50 \pm 7.5\text{cm}$ 、36N-F および 45N-F を $60 \pm 10\text{cm}$ とした。なお、使用した混和剤は、スランプ管理のコンクリートでは高性能 AE 減水剤 (Ad2) であり、スランプフロー管理のコンクリートには増粘剤一液型高性能 AE 減水剤(Ad1)を使用した。また、Ad1 の使用量が Ad2 の 2 倍から 3 倍程度となっているが、これは Ad1 に増粘剤が含まれていることや流動性を著しく高めているために多くなっている。単位水量は 174kg/m^3 と一定にした。また、粗骨材のかさ容積は、本工場で採用されている高性能 AE 減水剤を使用したスランプ管理のコンクリートと同一の値とし、細骨材率の調整等は行わなかった。各試験は表-3に示す方法に準じて行った。

3.2 試験結果および考察(実験 1)

表-4 にフレッシュ性状試験結果を示す。全てのコンクリートで目標のスランプ・スランプフロー値および空気量を満足した。また、36N-F および 45N-F の 50cm フロー時間が 3 秒程度であり、粘性が低く変形速度が速いのが今回検討した高流動コンクリートの特徴である。

ブリーディング試験結果を図-1 に示す。これによると、増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートは、通常の高性能 AE 減水剤を使用したものよりも小さいブリーディング量であった。これは、増粘剤一液型高性能 AE 減水剤に含まれる増粘成分のブリーディング抑制効果により減少したものと考えられる。

凝結試験結果を図-2 に示す。増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートは、混和剤の使用量が多いことなどから、スランプ管理のコンクリートに比べ始発および終結ともに凝結時間が若干遅延した。しかしながら、過度な遅延を示すものではなく、ブリーディング量が増えていないことから、力学性状や耐久性等に大きな影響を及ぼすようなものではないと考えられる。

圧縮強度試験結果を図-3 に示す。全ての材齢においてスランプ管理のコンクリートに比べスランプフロー管理のコンクリートの方が 1 割程度大きい圧縮強度であった。これは、スランプフロー管理のコンクリートの練上がり直後の空気量がスランプ管理のコンクリートに比べて小さいことが一因であると考えられるが、増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を用いることで、増粘剤による流動性を抑制した状態で混和剤の多量添加によるセメント粒子の分散性が向上したことも影響していると考えられる。

表-2 コンクリートの調合

記号	W/C (%)	目標 SL (SLF) (cm)	目標 空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
27N-S	59.3	21	4.5	174	294	951	879	1.470 ^{*1}
27N-F		(50)		174	294	951	879	4.116 ^{*2}
36N-S	47.1	21		174	370	877	890	1.480 ^{*1}
36N-F		(60)		174	370	877	890	4.440 ^{*2}
45N-S	39.0	21		174	447	801	903	2.682 ^{*1}
45N-F		(60)		174	447	801	903	4.917 ^{*2}

*1 : Ad2 *2 : Ad1

表-3 試験項目

項目	方法
スランプ (SL)	JIS A 1101
スランプフロー (SLF)	JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
間げき通過(U型フロー)	JSCE-F 511 (U型, 障害 R2)
ブリーディング	JIS A 1123
凝結時間	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108
静弾性係数	JIS A 1149
長さ変化	JIS A 1129-2
促進中性化	JIS A 1153, JIS A 1152
凍結融解	JIS A 1148 (水中法)

表-4 フレッシュ性状試験結果

記号	SL (SLF) (cm)	50cm フロー 時間 (s)	フロー 停止 時間 (s)	空気量 (%)	温度 (°C)	U型フロー	
						時間 (s)	高さ (mm)
27N-S	22.5	—	—	5.1	18	—	—
27N-F	(56.5)	2.7	10.9	4.9	18	10.9	331
36N-S	21.5	—	—	5.6	18	—	—
36N-F	(58.0)	2.7	13.5	5.1	18	12.4	340
45N-S	22.0	—	—	5.8	19	—	—
45N-F	(60.0)	2.9	16.6	4.6	19	14.2	335

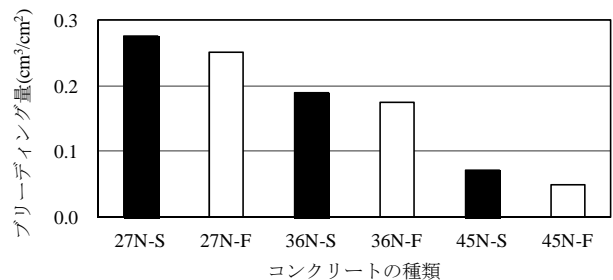


図-1 ブリーディング試験結果

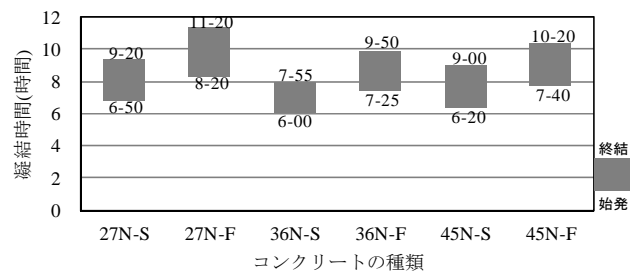


図-2 凝結試験結果

材齢 28 日における圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4 に示す。図中には、RC 規準⁴⁾による推定値(コンクリート密度 2.35t/m³, 粗骨材の種類による修正係数 $k_1=1.1$)を示している。図-4 より、全てのコンクリートが推定値とほぼ一致しており、本実験で使用した粗骨材が石灰岩碎石を 50%($k_1=1.2$), 砂岩碎石を 50%($k_1=1.0$)使用していることから整合が取れており、高流動コンクリートにすることで力学性状に与える影響はないと考えられる。

長さ変化試験結果を図-5 に示す。各水セメント比においてスランプ管理のものとスランプフロー管理のものを比較するとほぼ同等の値であり、高流動コンクリートにすることで長さ変化への影響はない結果であった。

促進中性化試験結果を図-6 に示す。同一の水セメント比であればスランプ管理とスランプフロー管理に大きな差はなく、長さ変化試験と同様な傾向であった。

凍結融解試験結果を図-7 に示す。同一水セメント比のコンクリートで比較すると、スランプフロー管理の高流動コンクリートの相対動弾性係数が小さいことが読みとれる。しかしながら、図-8 に示すように、練上がり直後の空気量と耐久性指数の関係をみると、空気量が小さいものほど耐久性指数が小さくなる傾向であった。よって、高流動コンクリートにすることで凍結融解抵抗性が低下するのではなく、硬化コンクリートに内在する空気量の影響を受けるものと考えられる。今回の検討範囲では、300 サイクル終了時点で相対動弾性係数 60%以上を満たしており、十分な耐久性を有していると考えられるが⁵⁾、今後、空気量と耐凍害性の関係を検討する必要があると考えられる。

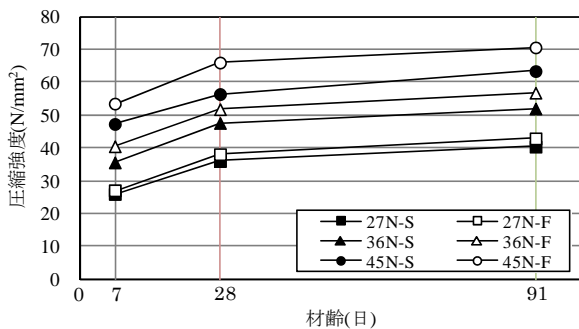


図-3 圧縮強度試験結果

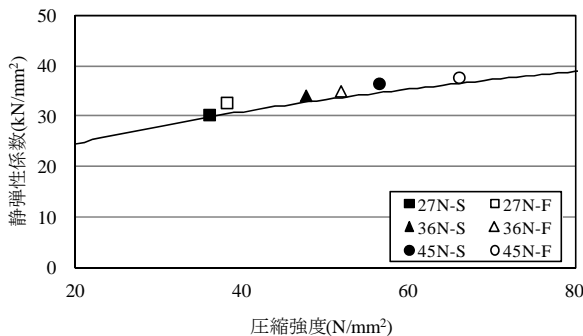


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係(材齢 28 日)

4. 実験 2 実機試験

4.1 概要(実験 2)

実験 2 では、実機ミキサを用いて標準期、夏期および冬期におけるフレッシュ性状および力学性状の検討を行った。コンクリートの調合を表-5 に示す。調合方針は実験 1 と同様であり、実験時期によって混和剤の添加量が若干変動している。試験項目を表-6 に示す。模擬柱および模擬床の寸法およびコア採取位置は図-9 に示すとおりである。なお、脱型は材齢 4 日とした。

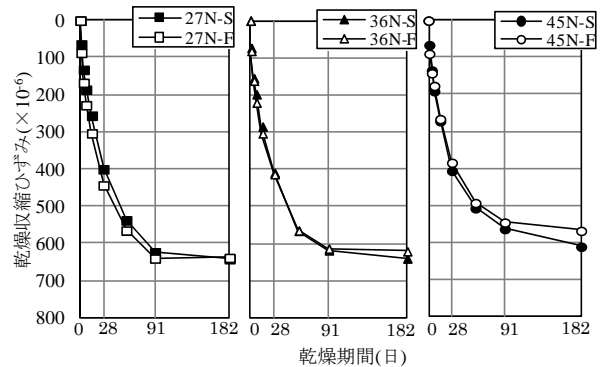


図-5 長さ変化試験結果

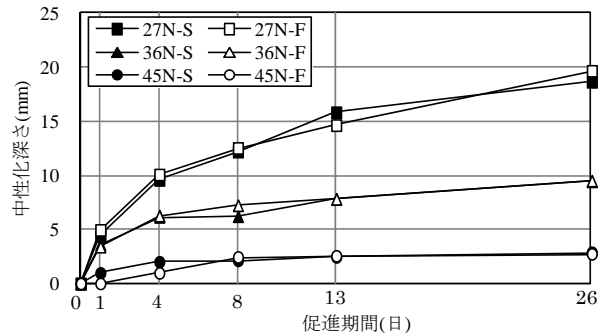


図-6 促進中性化試験結果

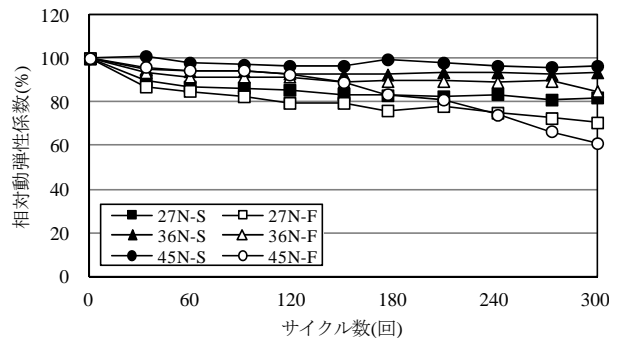


図-7 凍結融解試験結果

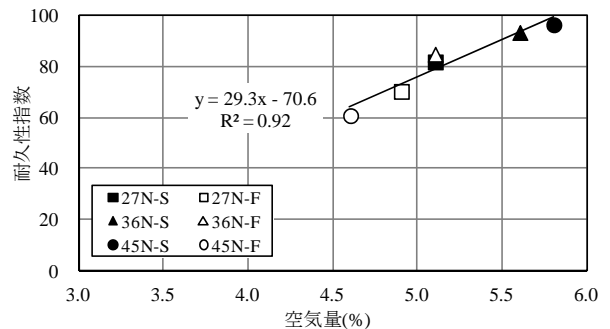


図-8 空気量と耐久性指数の関係

4.2 試験結果および考察(実験 2)

フレッシュ試験結果を図-10に示す。コンクリート温度は、標準期で約25℃、夏期で約35℃、冬期で約15℃のコンクリート温度であり、ほぼ想定していたコンクリート温度であった。スランプフローおよび空気量は、いずれも120分間基準値を満たす結果であった。そのため、練混ぜから荷卸しまでの経過時間の限度を120分に設定できると考えられる。

図-11にセメント水比と材齢28日標準水中養生圧縮強度の関係を示す。図中には、本工場で通常使用されている高性能AE減水剤を用いたコンクリートの強度算定式(JIS式)を決定した際の実験値を示している。スランプ管理のコンクリートと比較すると、スランプフロー管理である高流動コンクリートの圧縮強度のほうが5%程度大きい圧縮強度であった。この要因は、セメントの分散性やコンクリートの充填性が向上したことが一因であると考えられることから、スランプ管理のコンクリートと同様の強度算定式を用いて問題ないと考えられる。

図-12に材齢91日コア強度と構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の関係を示す。構造体強度補正值は、標準期で3N/mm²、

表-5 コンクリートの調合

時期	調合番号	W/C (%)	目標SLF (cm)	単位量(kg/m ³)					Ad2
				W	C	S	G	Ad2	
標準期	27-50 (標)	59.3	50	174	294	951	879	4.851	
	36-60 (標)	47.1	60	174	370	877	890	5.920	
	45-60 (標)	39.0	60	174	447	801	903	6.258	
夏期	27-50 (夏)	57.2	50	174	305	937	879	6.558	
	36-60 (夏)	45.8	60	174	380	869	890	7.790	
	45-60 (夏)	38.1	60	174	457	789	903	8.455	
冬期	27-50 (冬)	59.3	50	174	294	951	879	5.145	
	36-60 (冬)	47.1	60	174	370	877	890	6.105	
	45-60 (冬)	39.0	60	174	447	801	903	6.929	

表-6 試験項目

項目	方法
スランプ	JIS A 1101
スランプフロー	JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
圧縮強度	JIS A 1108
模擬柱・模擬床コア強度	JASS5T-605:2005, JIS A 1107

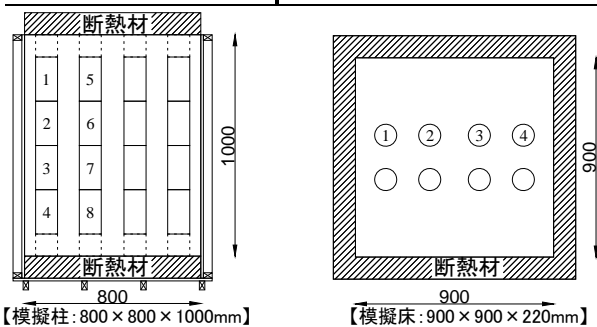


図-9 模擬柱および模擬床(コア採取: 柱8本, 床4本)

夏期および冬期で6N/mm²以下の値であり、JASS5-2009に示されている標準値と同等であった。

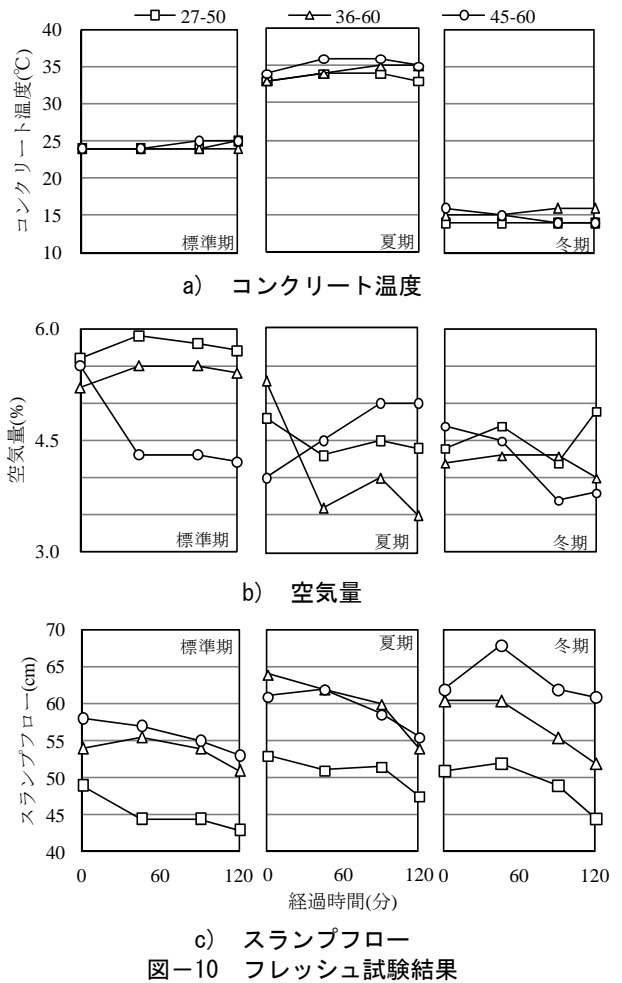


図-10 フレッシュ試験結果

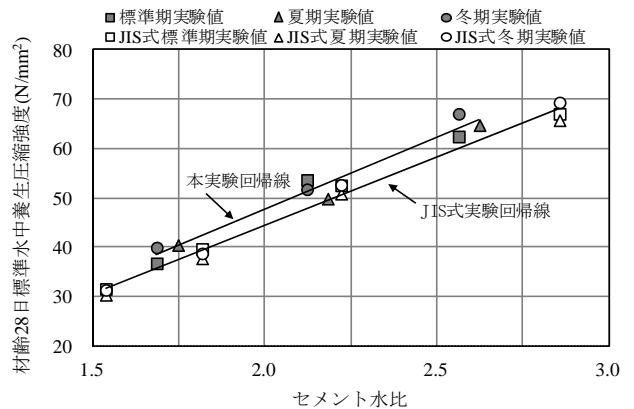


図-11 セメント水比と圧縮強度の関係

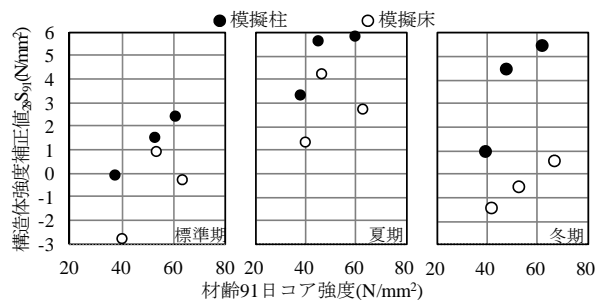


図-12 材齢91日コア強度と構造体強度補正值の関係

5. 実験 3 流動性回復実験およびポンプ圧送性実験

5.1 概要(流動性回復実験)

コンクリートの調合を表-7 に示す。流動性回復実験では、水セメント比 40.0%および 50.9%の 2 水準とした。なお、水セメント比 40.0%では室内試験および実機試験を行い、水セメント比 50.9%のものは室内試験のみ実施した。目標スランプフローは全てのコンクリートで 60±10cm とした。目標空気量は、水セメント比 40.0%のものは適用部位によっては空気量 3.0%の目標値も想定されることから目標空気量 3.0±1.5%とし、水セメント比 50.9%のものは目標空気量 4.5±1.5%とした。流動性の回復に使用した混和剤は、増粘剤を含まない高性能 AE 減水剤(Ad2, 記号-高)および流動化剤(Ad3, 記号-流)である。なお、水セメント比 40.0%で実機試験と室内試験で混和剤(Ad1)の使用量が異なるのは、ミキサの練混ぜ能力や練混ぜ量の違いによるものと考えられる。攪拌は、実機試験では混和剤添加後に 120 秒間の高速攪拌、室内試験では、混和剤添加後に 60 秒間の攪拌を行った。また、本実験では経時中には攪拌等をせず、スランプフローの低下が大きくなるような条件下で実施した。

5.2 実験結果および考察(流動性回復実験)

図-13 に空気量試験結果、図-14 にスランプフロー試験結果を示す。コンクリート温度に関しては、実機試験では 25℃前後、室内試験では 23℃前後を推移した。後添加は室内試験では目標管理値を下回った時点、実機試験

表-7 コンクリートの調合

記号	W/C (%)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					Ad2 又は Ad3
			W	C	S	G	Ad1	
WC40.0-高(実機)	40.0	3.0	174	435	850	900	7.830	1.218*2
WC40.0-高(室内)	40.0	3.0	174	435	850	900	4.785	1.305*2
WC40.0-流(室内)	40.0	3.0	174	435	850	900	4.785	1.740*1
WC50.9-高(室内)	50.9	4.5	174	342	906	884	3.933	0.770*2
WC50.9-流(室内)	50.9	4.5	174	342	906	884	3.591	0.684*1

後添加混和剤 *1: Ad2, *2: Ad3

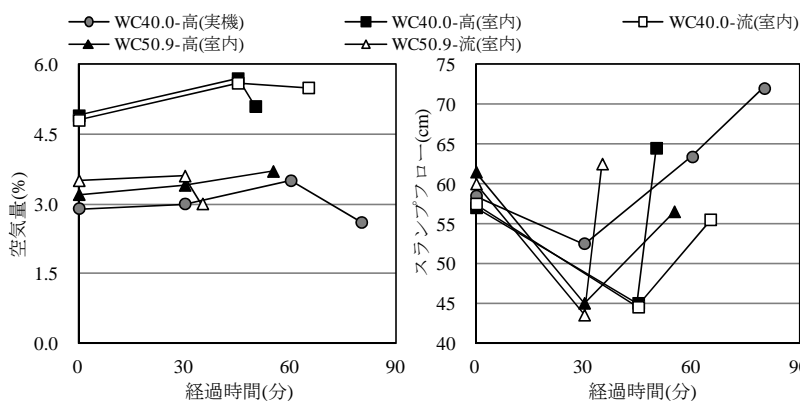


図-13 空気量試験結果

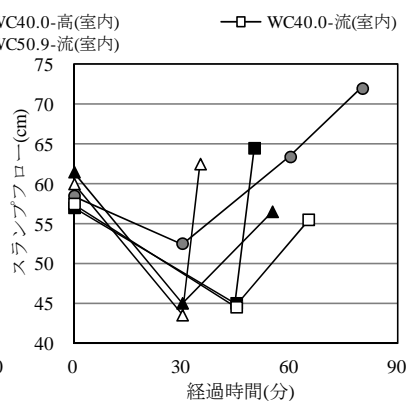


図-14 スランプフロー試験結果

では目標値の下限値寄りの値になった時点で混和剤を後添加した。混和剤添加後のフレッシュ試験開始までの時間に違いがあるために、流動性の回復傾向に若干の違いはあるものの、高性能 AE 減水剤および流動化剤の 2 種類とも空気量は目標値を満たし、スランプフローも目標値に回復することが認められた。また、実機試験では目標管理値の上限値を超える流動性までスランプフローを増大させたが、材料分離等は認められず、目標管理値内であれば、コンクリートの状態は良好であることが確認できた。

図-15 に圧縮強度試験結果を示す。後添加した混和剤の種類によらず、流動性を目標管理値に回復させたもの(凡例: 60cm 回復)はベースコンクリートと同等の圧縮強度であり、実機試験において 70cm を超えるスランプフローまで流動性を回復させたもの(凡例: 70cm 回復)にも強度低下は認められなかった。

5.3 概要(ポンプ圧送性実験)

圧送管の配管方法を図-16 に示す。圧送長は直線換算距離⁶⁾で 105m である。コンクリートポンプ車は、最大吐出圧力 6.6MPa、シリンダー径φ225mm、ストローク 1650mm の油圧ピストン式ポンプ車を使用した。圧力計は 2 点設置し(P1, P2)、コンクリートシリンダーの全面圧(P0)は、各水準において定常状態になった時のポンプ車の主油圧を油圧ゲージから読み取り、シリンダー比を乗じて算出した。コンクリートの圧送は、理論吐出量 12.2m³/h および 25.0m³/h において実施したが、フレッシュ試験および力学試験は理論吐出量 25.0m³/h のみで実施した。コンクリートの調合を表-8 に示す。水セメント比 43.1%とし、目標空気量 3.0%で実施した。

5.4 実験結果および考察(ポンプ圧送性実験)

コンクリートの圧送は、閉塞や分離等を起こすことなく可能であった。理論吐出量 25.0m³/h で圧送したコンクリートと圧送前のコンクリートのフレッシュ試験結果を表-9 に示す。本実験は、コンクリート温度が 12℃程度

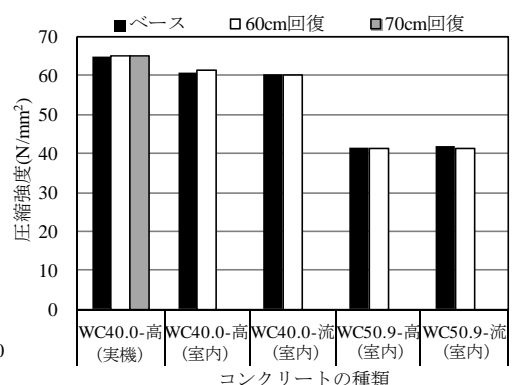


図-15 圧縮強度試験結果

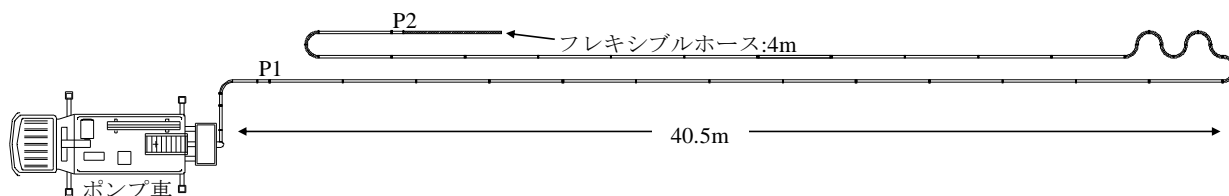


図-16 圧送管の配管方法

表-8 コンクリートの調合

W/C (%)	目標空気量(%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad1
43.1	3.0	174	404	882	895	6.460

表-9 フレッシュ試験結果

採取時期	SLF (cm)	50cm フロー時間(s)	フロー停止時間(s)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)
圧送前	69.0	3.9	37.5	2.7	12
圧送後	60.0	4.3	23.6	2.2	11

と低い条件下であった。スランブフローは、圧送後に若干の低下は認められるものの、管理値以内(60±10cm)であり、目視による異常も認められなかった。

管内圧力の測定結果を図-17に示す。今回の測定では、測定点が少ないものの、いずれの理論吐出量でもほぼ直線的な関係が認められた。また、圧力損失は理論吐出量 12.2m³/h で 14.7kPa/m であり、理論吐出量 25.0m³/h では 31.3kPa/m であった。

圧送前後の圧縮強度試験および静弾性係数試験結果(材齢 28 日)を図-18に示す。圧送前後に大きな差は認められず、ほぼ同等であることが確認できた。

6. まとめ

増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートの諸性状について、標準期、夏期および冬期による温度条件の違いや、混和剤の添加量が異なる条件下で検討を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 実機試験より、全ての時期において 120 分間良好なフレッシュ性状を有していた。
- 2) 流動性が低下した場合に増粘剤を含まない高性能 AE 減水剤および流動化剤を添加することで、流動性が回復することが認められた。
- 3) 増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を用いることで、スランブ管理のコンクリートよりもブリーディング量が若干減少する傾向が認められた。
- 4) 凝結時間は、始発および終結ともに遅延する傾向が認められた。
- 5) 圧縮強度はスランブ管理のコンクリートに比べ若干大きくなる傾向が認められた。
- 6) 構造体強度補正值は JASS5-2009 に示されている標準値と同等であった。
- 7) 長さ変化および中性化に関しては、スランブ管理のコンクリートと同等であった。

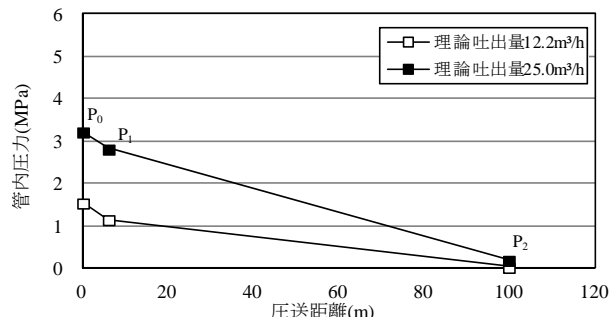


図-17 管内圧力の測定結果

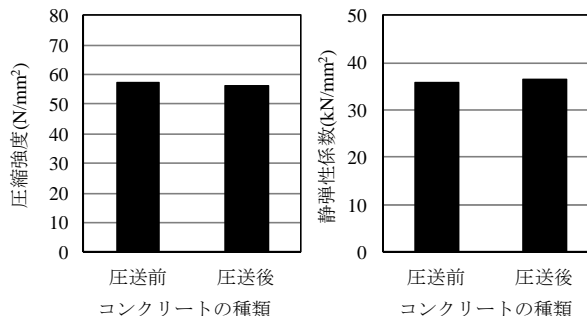


図-18 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

- 8) 凍結融解抵抗性は、空気量の減少に伴い低下する傾向が認められるものの、今回の検討範囲では十分な耐久性を有していると考えられる。
- 9) コンクリートポンプ車による圧送によってフレッシュ性状および力学性状に大きな影響はないことから圧送は可能であると考えられる。

参考文献

- 1) セメント新聞社：特集「高流動コンクリートの現状と展望」月刊コンクリートテクノ、Vol.29, No.3, pp.70-116, 2010.3
- 2) (例えば) 友澤史紀ほか：各種高流動コンクリートの特性評価および実大模型打設実験(その1実験概要), 日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集, pp.1145-1146, 1993.9
- 3) 小泉信一ほか：新規な低粘性型増粘剤系高流動コンクリートの基本特性(その1・その2), 日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集, pp.315-318, 2011.8
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp.38-39, 1999.11
- 5) 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, pp.616-619, 2009
- 6) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, pp.26-27, 1994