

報告 早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートのフレッシュ性状の経時変化に及ぼす化学混和剤および温度の影響

恩田 陽介*1・基 哲義*2・佐々木 亘*1・松田 拓*3

要旨：本報告では早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートに対して、複数の化学混和剤を用い、スランプおよび空気量の経時変化を測定した。本実験では室内試験と実機試験を実施し、室内試験においては、パラメータとして練上り温度を変化させた。その結果、練上り温度が 30, 35℃となってもスランプの低下を抑制することが可能であることが確認された。実機試験においては、実機製造での化学混和剤の適用可能性を検討した。その結果、実機製造においてもスランプ低下の抑制が可能であることが確認された。

キーワード：化学混和剤, スランプ, 空気量, 練上り温度, 実機試験

1. はじめに

コンクリートのスランプ保持性能は構造物の品質確保を考えるうえで重要な性能の一つである。近年、産業副産物の有効利用やコンクリート構造物の耐久性向上などを目的に、フライアッシュ（以下, FA）や高炉スラグ微粉末（以下, BFS）といった混和材のコンクリートへの利用を拡大する取組みが多くなされている。一方でこのような混和材を使用したコンクリートは時間経過に伴うスランプ低下が、セメント単味のコンクリートに比べて大きいことも指摘されており¹⁾、利用拡大に向けてはこれらを用いたコンクリートのスランプ保持性能の確保も大きな課題となっている。

筆者らはこれまでに、現場打ち PC 上部工への適用を想定した早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリート²⁾について種々の検討を行っており^{3,4)}、異なる化学混和剤（A～D）を用いた場合のスランプや空気量の経時変化を測定（以下、経時変化試験と称す）し、そのスランプの低下に対してスランプ保持性能が高い化学混和剤があることを確認している（図-1）。⁴⁾図-1 では FA や BFS を用いた配合で混和剤 C, D を用いた場合に、いずれもスランプが横ばいになる傾向を示しており、スランプ保持性能が得られていることがわかる。

一方、将来的な気候変動による外気温の上昇や生コン工場の減少による運搬距離の増大を考えると、通常のセメント単味の配合においてもさらなるスランプ保持性能を求めることには意義があると考ええる。そこで本報告では、室内試験として、既報⁴⁾において使用した複数の化学混和剤を用いた場合の経時変化試験を練上り温度をパラメータとして実施した。その後、実機試験として、室内試験で効果の得られた化学混和剤を用いて実際のレデ

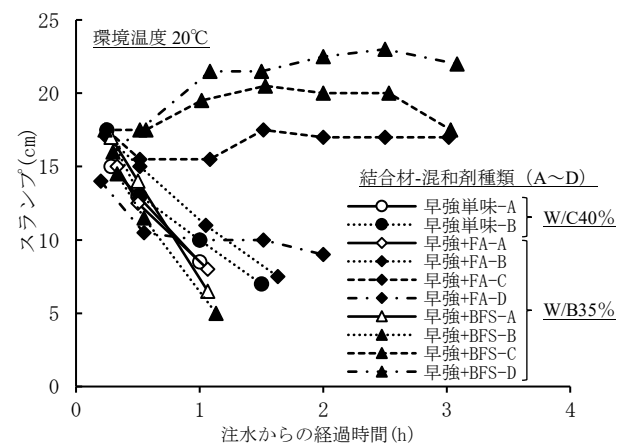


図-1 既往の実験⁴⁾におけるスランプの経時変化
(FA, BFS を使用した早強コンクリートにおける経時変化試験結果の一例、既報⁴⁾を元に再作図)

表-1 使用材料

材料	物性等	記号	室内/実機
水	上水道水	W	室内・実機
結合材	セメント (記号: C)	早強ポルトランドセメント 密度3.13g/cm ³	H1 室内
		早強ポルトランドセメント 密度3.14g/cm ³	H2 実機
細骨材 (記号: S)	砕砂	佐野産砕砂 密度2.73g/cm ³	S1 室内
		佐野市会沢産砕砂 密度2.68g/cm ³	S2 実機
	陸砂	神栖市波崎産 密度2.65g/cm ³	S3 実機
		佐野市仙波産 密度2.58g/cm ³	S4 実機
粗骨材 (記号: G)	碎石	岩瀬産碎石2005 密度2.66g/cm ³	G1 室内
		佐野市水木産碎石2005 密度2.71g/cm ³	G2 実機
		佐野市仙波産碎石2005 密度2.71g/cm ³	G3 実機
化学 混和剤	高性能AE 減水剤 (記号: SP)	ポリカルボン酸エーテル系 化合物	A, B, C, D 室内・実機
	空気量 調整剤	変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤	AE 室内・実機

*1 三井住友建設 技術研究所 建設材料グループ(正会員)

*2 三井住友建設 技術研究所 土木構造グループ

*3 三井住友建設 技術研究所 建設材料グループ長 (正会員)

表-2 配合

配合	W/B	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										SP (C×wt%)	AE (C×wt%)
			W	C		S				G				
				H1	H2	S1	S2	S3	S4	G1	G2	G3		
室内試験	0.40	43.0	160	400	－	784	－	－	－	1011	－	－	0.7～1.2	0.0005～0.008
実機試験	0.40	45.7	171	－	428	－	397	236	152	－	477	474	1.0～1.2	0.001～0.004

表-3 配合の概要

	既報 ³⁾	本報告	
		室内試験	実機試験
W/B	40or35%	40%	40%
W	160kg/m ³	160kg/m ³	171kg/m ³
S	山砂+砕砂	砕砂単味	陸砂2種類+砕砂
G	砕石1種類	砕石1種類	砕石2種類

表-5 実験条件および試験内容

		室内試験				実機試験
化学混和剤		A, B, C, D				
目標値	スランブ	18±2.5cm				
	空気量	4.5±1.5%				
	練上り温度	10℃	20℃	30℃	35℃	29℃ (実測)
試験項目		経時変化試験 (スランブ, 空気量, コンクリート温度) ブリーディング試験 (φ150×300mmブリキ製型枠を使用) 凝結試験 (JIS A 1147準拠) 圧縮強度試験 (材齢1, 2, 3, 7, 28日)				
経時変化試験中のコンクリートの条件		練り舟に静置, 試験直前に人力による切り返し				アジテータ車内にて低速攪拌, 試験直前に30秒間の高速攪拌
環境条件	静置, ブリーディング, 凝結試験時	10℃	20℃	30℃	35℃	現場外気温 (平均29℃)
	スランブ, 空気量測定時	10℃	20℃	現場外気温 (平均29℃)	現場外気温 (平均24℃)	
圧縮強度試験体の養生条件		10℃封緘	20℃水中	30℃封緘	35℃封緘	現場封緘

表-4 実験水準

結合材	練上がり温度の目標値	混和剤種類	既報 ³⁾	本報告	
				室内試験	実機試験
早強ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末	20℃	A	○		
		B	○		
		C	○		
		D	○		
早強ポルトランドセメント+フライアッシュ	20℃	A	○		
		B	○		
		C	○		
		D	○		
早強ポルトランドセメント	10℃	A		○	
		B		○	
		C		○	
		D		○	
	20℃	A	○	○	
		B	○	○	
		C		○	
		D		○	
	—	A			○
		B			○
		C			○
		D			○
	30℃	A		○	
		B		○	
		C		○	
		D		○	
	35℃	A		○	
		B		○	
		C		○	
		D		○	

イーミクストコンクリート工場で製造し、その適用可能性を検証した。

2. 実験概要

2.1 室内試験

(1) 使用材料

本実験における使用材料を表-1 に示す。表-1 には室内試験と実機試験のいずれについて使用したかを併記した。PC 上部工への適用を想定し、セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。細骨材には砕砂を単味で用い、粗骨材には粗骨材の最大寸法が 20mm の砕石を用いた。化学混和剤には複数の高性能 AE 減水剤と AE 剤を用いた。高性能 AE 減水剤は A を基準として、アルファベットが進むにつれて遅延成分と保持ポリマーを順次調

整したものである。

(2) 配合

本実験の配合を表-2 に示す。W/C は 40% とし、単位水量は 160kg/m³ とした。表-3 に既報⁴⁾と本報告における配合の概要を示す。既報⁴⁾の水結合材比 (W/B) は早強ポルトランドセメント単味の配合で 40%、早強ポルトランドセメントに FA や BFS を用いた配合で 35% としている。既報⁴⁾と比較して、W/C は早強ポルトランドセメント単味の配合と同様であるが、細骨材の種類は異なる。

(3) 練混ぜ手順

室内試験の練混ぜには公称容量 100 リットルの強制二軸ミキサ (大平洋機工社製) を用いた。練混ぜ手順は以下の通りとした。まず結合材と細骨材を投入し 10 秒間空練りを行い、その後水を投入し 90 秒練り混ぜた。その後掻き落としを行い、粗骨材を投入し、再度 90 秒間練混ぜ排出した。排出後速やかに各試験用の試料を採取した。

(4) 室内試験の実験水準

表-4 に既報⁴⁾および本報告における実験の水準を示す。既報⁴⁾では、早強ポルトランドセメント単味および早強ポルトランドセメントに FA や BFS を混合したコンクリートに対して室内 20℃で試験を行った。本報告では早強

表-6 室内験における化学混和剤の使用量および練上り直後のフレッシュ性状

練上り温度の目標値	混和剤種類	SP量 (C×wt%)	AE量 (C×wt%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
10°C	A	0.7	0.0005	19.0	4.1	11.0
	B	1.0	0.001	20.5	4.2	11.0
	C	1.2	0.008	19.0	4.5	11.0
	D	1.1	0.007	19.5	4.2	11.0
20°C	A	0.8	0.001	22.0	4.6	21.1
	B	0.8	0.001	20.5	4.7	21.4
	C	0.8	0.002	19.0	4.9	22.0
	D	0.8	0.002	19.5	3.5	21.9
30°C	A	0.9	0.0015	19.5	4.6	33.0
	B	0.9	0.0015	20.5	3.3	33.0
	C	0.9	0.002	19.5	3.4	33.2
	D	0.9	0.0025	19.0	4.0	33.0
35°C	A	1.0	0.004	19.0	5.4	36.7
	B	1.0	0.006	20.0	5.5	36.8
	C	1.0	0.006	19.5	4.1	35.1
	D	1.0	0.006	21.0	5.7	36.6

ポルトランドセメント単味のコンクリートに対して、練上り温度を 10, 20, 30, 35°Cとした。各練上り温度に対して既報⁴⁾で使用したものと同一化学混和剤を使用した。練上り温度は各材料・ミキサを加温・冷却することで調整した。練上り温度 10°Cの条件については他温度と異なる公称容量 55 リットルの強制二軸ミキサ（大平洋機工社製）で製造した。

(5) 実験条件および試験内容

表-5 に本実験の実験条件を示す。練上り直後の目標値は、スランプで $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量で $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

本実験では経時変化試験、ブリーディング試験、凝結試験、および圧縮強度試験を実施した。

経時変化試験はスランプ、空気量およびコンクリート温度について、練上り直後、注水からの経過時間 30, 60, 90, 120, 150, 180 分でそれぞれ測定し、スランプの値が 10cm 以下となった時点で試験を終了とした。練上がった試料は練上り温度と同じ室温に調整された室内に静置し、試験直前に人力による切り返しを実施した。なお、練上り温度 30, 35°Cにおいては、スランプおよび空気量の測定は現場外気温で実施した。

ブリーディング試験はコンクリートのブリーディング簡易試験方法（試案）⁵⁾に準じ、 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ のブリキ製型枠を用いて実施した。

凝結試験は JIS A 1147 に準拠して実施した。また、ブリーディング試験と凝結試験は練上り温度の目標値と同じ室温とした室内で試験を実施した。

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して行い、材齢 1, 2, 3, 7, 28 日で試験を実施した。圧縮強度試験用供試体の養生方法は目標練上り温度 20°Cでは標準水中養生、その他の練上り温度では目標練上り温度と同じ温度環境下で封緘養生とした。

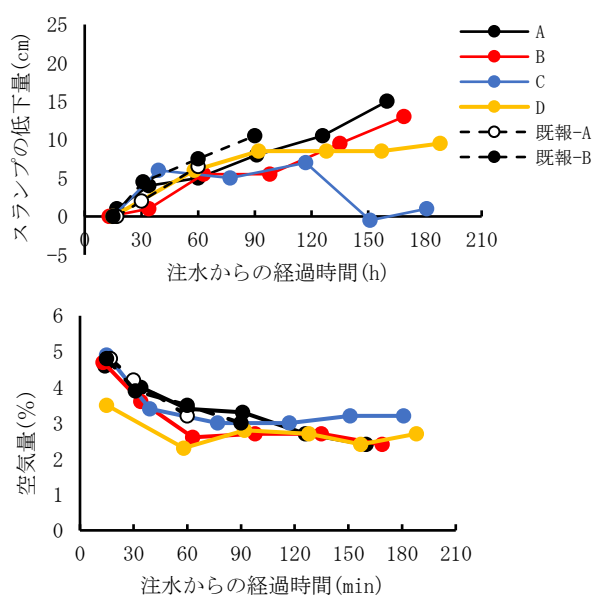


図-2 室内試験（20°C）と既往実験結果との比較

2.2 実機試験

(1) 使用材料

実機試験の使用材料を表-1 に示す。細骨材には砕砂と複数の陸砂を混合して用いた。粗骨材には産地の異なる複数の碎石を混合して用いた。化学混和剤については室内試験と同様とした。

(2) 配合

表-2 に配合を示す。また、配合の概要について表に示す。W/C は 40%とし、単位水量は 171kg/m^3 とした。

(3) 練混ぜ手順

練混ぜ手順は以下の通りとした。まず、砕砂、セメント、陸砂投入後空練りを 10 秒間行い、練混ぜ水を投入し 30 秒練混ぜた。その後粗骨材を投入して 60 秒間練混ぜたのちにアジテータ車に排出することとした。前述の手順で 1m^3 を 2 バッチ練り混ぜ、両方のバッチをアジテータ車で混合してから運搬した。現地に到着後、各種試験用の試料を採取した。

(4) 実験条件および試験内容

実機試験では練上がりの目標値を荷降ろし時の受け入れ検査で判断することとし、値については室内試験と同じとした。

室内試験と同様に、経時変化試験、ブリーディング試験、凝結試験、圧縮強度試験を実施した。経時変化試験では、コンクリートはアジテータ車で低速攪拌しつつ、測定直前に 30 秒間の高速攪拌を行った。ブリーディング試験および凝結試験は現場外気温で実施した。圧縮強度試験用の供試体は現場外気温で封緘養生を行った。

3. 実験結果

3.1 室内試験

(1) 経時変化試験結果

表-6 に練上り直後のフレッシュ性状を示す。練上り直

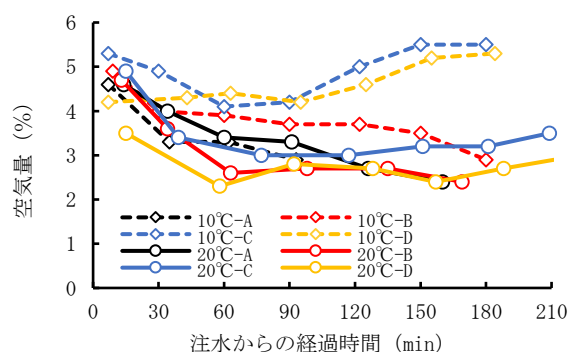
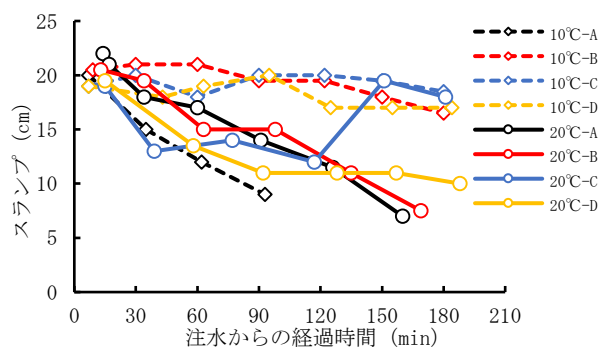


図-3 室内試験における経時変化試験結果 (10, 20℃)

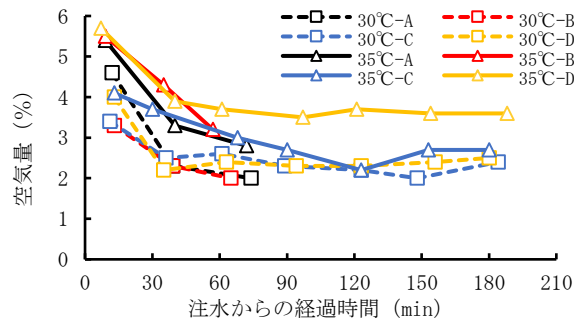
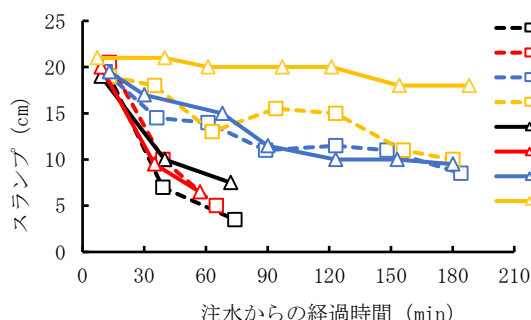


図-4 室内試験における経時変化試験結果 (30, 35℃)

表-7 ブリーディング試験および凝結試験結果

練上り 温度の 目標値	化学 混和剤	ブリー ディング量 (cm^3/cm^2)	凝結 (h:min)	
			始発	終結
10℃	A	0	7:30	10:30
	B	0.01	10:05	12:50
	C	0.02	14:40	17:55
	D	0.04	15:15	18:20
20℃	A	0.05	5:10	7:00
	B	0.03	5:35	7:30
	C	0.13	8:00	9:45
	D	0.16	8:20	10:10
30℃	A	0	3:20	4:35
	B	0	5:05	6:10
	C	0	7:00	8:15
	D	0	10:10	11:55
35℃	A	0	3:35	4:35
	B	0	5:00	6:05
	C	0	7:30	8:35
	D	0	11:00	12:05

後のスランプおよび空気量はいずれも目標の範囲内であった。練上り温度については20℃以外の温度条件では目標値に対して1~3℃程度高くなった。

図-2~4 は横軸に注水からの経過時間、縦軸にスランプおよび空気量を示している。図-2 には本実験のうち練上りの目標温度 20℃で行った結果と前述した筆者らの既報⁴⁾の結果を併せてプロットしている。

既報⁴⁾と本実験の結果を比較すると、経時によるスラ

ンプの低下量は概ね同様の傾向にあるものと思われる。また、混和剤 C,D ではスランプの経時による低下が混和剤 A,B と比較して少なくなっていることがわかる。

図-3 に練上り温度の目標値が 10, 20℃の試験結果を示し、図-4 に 30, 35℃の試験結果を示す。

スランプの結果より、練上り温度が 10℃の条件では混和剤 B,C,D、練上り温度が 20, 30, 35℃では混和剤 C,D でスランプの低下が小さくなる傾向にあった。これについては高性能 AE 減水剤に添加された遅延成分や保持ポリマーにより混和剤 C,D ではいずれの環境温度でもスランプの低下を抑制したものと考えられる。環境温度 10℃では混和剤 B でもスランプの低下抑制効果が見られた。

空気量は、概ね同様な低下傾向を示したが、練上り温度 10℃のときの混和剤 C,D でより空気量の低下が少ない。これについては表-6 に示すように空気量調整剤が他と比較して多かったことが影響しているものと考えられる。

(2) ブリーディング試験結果

本報告と類似した配合でのブリーディングに関する既往の研究として、谷口ら⁹⁾は W/C40%の配合で単位水量を変化させそのブリーディング量を測定している。その結果によれば単位水量 160~185 kg/m^3 の範囲でブリーディング量は 0.02~0.09 cm^3/cm^2 となっている。

本報告のブリーディング試験の結果を表-7 に示す。練上り温度 20℃において、混和剤 A を用いた場合では 0.005 cm^3/cm^2 、混和剤 B では 0.003 cm^3/cm^2 となっており、谷口らの研究と同程度の値を示している。混和剤 C,D を用いた場合のブリーディング量は C で 0.13 cm^3/cm^2 、D で

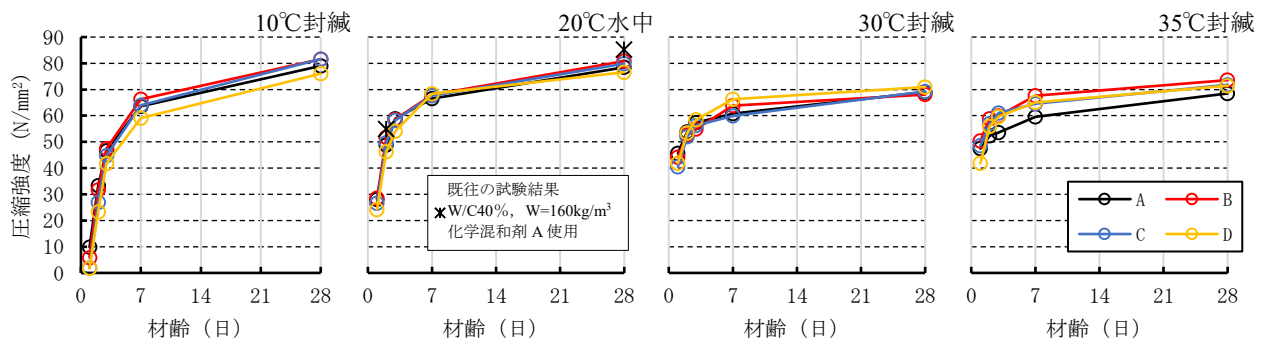


図-7 室内試験の圧縮強度試験結果

表-8 荷卸し時のフレッシュ性状

混和剤種類	SP量 (C× wt%)	AE量 (C× wt%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
A	1.2	0.001	20.0	3.8	29
B	1.1	0.001	19.0	4.9	29
C	1.2	0.003	18.5	4.5	29
D	1.2	0.003	19.5	4.5	29

0.16cm³/cm²となっており、AとBに比べて比較的大きい値を示した。これについては、混和剤C、Dに含まれている保持ポリマーの作用により、スランプが保持されてブリーディング時間が伸びたことによるものと考えられる。

練上り温度30°C、35°Cではいずれの混和剤を用いた場合でもブリーディング量はほぼゼロであった。これについては温度が高いことで水和反応が促進されたことによるものと推察する。一方で20°Cと比較して温度が低い条件である10°Cでは20°Cと比較してブリーディング量が小さくなった。これは、練上り温度10°Cのみ使用したミキサが異なり、分散性などに違いがでたと推察する。

渡辺ら⁷⁾はフレッシュ性状適否を判断する閾値としてブリーディング量0.35cm³/cm²を提案している。また、建築の分野ではJASS5 23節水密コンクリート⁸⁾においてブリーディング量の規準を0.3cm³/cm²と規定している。本実験のブリーディング量は混和剤C、Dの使用により増加したが、0.3、0.35cm³/cm²に対して低い値となった。

(3) 凝結試験結果

凝結試験の結果を表-7に示す。混和剤種類について着目すると、いずれの練上り温度においても凝結が早い順に混和剤A、B、C、Dとなった。これは、遅延成分がAを基準として増加しているためと考える。

練上り温度について着目すると、混和剤A、B、Cでは練上り温度20°Cに対して、30°C、35°Cでは凝結は早まり、10°Cでは遅延した。混和剤Dでは練上り温度20°Cに対して、30、35、10°Cのいずれも遅延した。これについては、混和剤A、B、Cでは一般的なコンクリートと同様な傾向と考える。混和剤Dでは混和剤の添加量が20°Cと比較して増加していることにより、より凝結遅延成分が

多く添加されたものとする。

以上より、凝結については一部の混和剤で温度が高い条件でも遅延する傾向がみられた。実施工においては施工計画の際に留意する必要があるものと思われる。

(4) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験の結果を図-7に示す。圧縮強度試験結果のうち、20°C水中養生を行った結果には、筆者らが別の実験で作製したW/C40%、W=160kg/m³であり化学混和剤Aを使用したコンクリートの試験結果を併せてプロットしている。本実験における強度試験結果は既往の試験結果と大きな差はみられなかった。

化学混和剤の影響についてはいずれの養生条件においても強度の大きな差はみられなかった。

3.2 実機試験

(1) 経時変化試験結果

実機試験における化学混和剤の使用量と荷卸し時のフレッシュ性状を表-8に示す。荷卸し時のスランプおよび空気量は目標値の範囲内であった。コンクリート温度はいずれも29°Cであった。

経時変化試験の結果を図-8(a)、(b)に示す。

図-8(a)、(b)によるとスランプの経時変化は少ない順に化学混和剤D、C、B、Aとなった。この傾向は練上り温度の目標値が30°Cの室内試験結果と同様であるが、室内試験と比較すると実機試験ではよりスランプの低下が抑制されている。これについては配合や表-5に示す経時変化試験中のコンクリートの条件が異なることで試験直前の攪拌の程度が異なることによるものとする。

空気量については、化学混和剤A、Bでは低下する傾向にあり、C、Dでは練上りから若干増加した後に保持される傾向にあった。練上り温度の目標値が30°Cの室内試験結果と比較して、室内試験では注水から30分で空気量が大きく低下しているのに対して、実機試験ではその傾向はみられない。スランプと同様に配合や経時変化試験中のコンクリートの条件が影響しているものとする。

(2) ブリーディング試験結果

実機試験の配合によるブリーディング試験と凝結試験の結果を表-9に示す。ブリーディング試験の結果では、

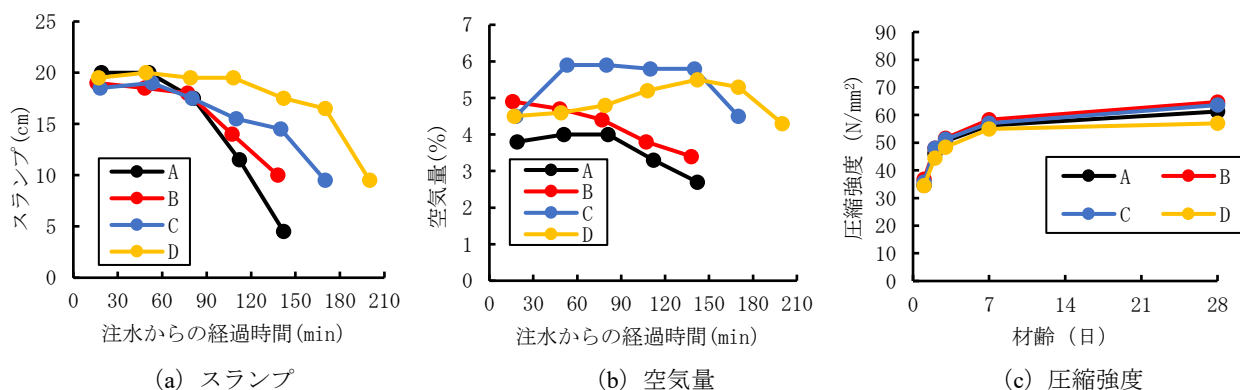


図-8 実機試験における経時変化試験および圧縮強度試験結果

表-9 ブリーディング試験および凝結試験結果(実機)

混和剤種類	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)	凝結 (h:min)	
		始発	終結
A	0.006	3:50	4:40
B	0.012	4:30	5:35
C	0.003	5:20	6:15
D	0.026	6:10	7:00

ブリーディング量が $0.003 \sim 0.026 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ となった。練上り温度が概ね同様な室内試験 30°C の結果ではブリーディングが発生しなかったが、実機試験では少量ではあるがブリーディングが発生した。これについては単位水量や骨材が異なることが関係しているものとする。

(3) 凝結試験結果

凝結試験の結果では、最も始発が早かったのは混和剤 A で 3 時間 50 分であった。混和剤 B は 4 時間 30 分、混和剤 C は 5 時間 20 分、混和剤 D は 6 時間 10 分であった。始発から終結までの時間についてはいずれの混和剤も大きな差はみられなかった。

(4) 圧縮強度試験結果

実機試験時の圧縮強度試験結果を図-8(c)に示す。

混和剤 D を用いた配合では各材齢の圧縮強度が他配合に対して若干小さい値を示したが、その程度は小さく大きな影響はないものとする。

4. まとめ

本報告では、既報⁴⁾において早強ポルトランドセメントをベースとし混和材を用いたコンクリートで検証された複数の化学混和剤によるスランプの低下を抑制する効果について、早強ポルトランドセメント単味の配合を対象に実験を実施した。その結果、既往の研究と同様に早強ポルトランドセメント単味の配合においてもスランプの低下を抑制可能であることが確認された。

本報告で得られた成果を以下に示す。

- (1) 練上り温度を変化させた室内試験では、一部の化学混和剤は練上り温度が $30, 35^\circ\text{C}$ であっても高いスランプ保持性能を有することが確認された。
- (2) いずれの化学混和剤を用いた場合でもブリーディングと圧縮強度は大きな差がみられなかった。

- (3) 凝結は一部の化学混和剤で練上り温度が $30, 35^\circ\text{C}$ の条件でも練上り温度 20°C と比較して遅延した。
- (4) 実機試験では、比較的高い外気温の条件ならびに実施工に近い条件においてもスランプ保持性能を発揮し、その実機製造への適用性が確認された。

本実験においては、単位水量およびセメントや骨材の種類などが与える化学混和剤のスランプ保持性能への影響を考慮していない。これらは今後の課題と考える。

参考文献

- 1) たとえば根岸稔, 檜垣誠, 西祐宣, 守谷健一: 高炉スラグ微粉末を大量混合したコンクリートの経時安定性改善に関する一提案, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-463, pp.925-926, 2012.9
- 2) 土木研究所, プレストレストコンクリート建設業協会: 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (II), 2016.1
- 3) 佐々木亘, 石澤正大, 基哲義, 谷口秀明: 打ちPC 橋への適用を想定したフライアッシュコンクリートの強度表現, プレストレストコンクリート工学会第 26 回シンポジウム論文集, pp.537-540, 2017.10
- 4) 恩田 陽介, 基 哲義, 佐々木 亘, 谷口 秀明: 混和材を用いたコンクリートのフレッシュ性状経時変化への化学混和剤の影響, 第 27 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.321-324, 2018.11
- 5) 日本コンクリート工学会: 構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, pp.252-255, 2017.6
- 6) 谷口 秀明, 樋口 正典, 藤田 学: 高強度コンクリートの打上がり面の表面仕上げ方法に関する検討, 三井住友建設技術研究所報告, 第 2 号, pp.47-52, 2004.11
- 7) 15.3 性能規定に対応したコンクリート構造物の施工品質管理・検査に関する研究 (1): <https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2015/pdf/pro-15-3-1.pdf> (閲覧日: 2019 月 1 日 8)
- 8) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, p.606, 2018.7