

早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートの フレッシュ性状や耐久性に及ぼす化学混和剤の影響

Effects of Chemical Admixtures on Properties of Fresh Concrete and Durability of Hardening Concrete Using High-early-strength Portland Cement

技術研究所 基 哲義 DAI AKIYOSHI
技術研究所 恩田 陽介 ONDA YOSUKE
技術研究所 佐々木 亘 SASAKI WATARU
技術研究所 松田 拓 MATUDA TAKU

本論文は、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スランプの保持性能を高めた高性能 AE 減水剤を適用し、スランプや空気量の経時変化および耐久性に関する試験を実施した結果について報告するものである。一連の検討から、保持性能を高めた高性能 AE 減水剤を使用すると 1) 練上がり温度が 30℃以上であってもスランプの低下を抑制可能であること、2) コンクリートの耐久性は従来の高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートと同程度である事が分かった。

キーワード：高性能 AE 減水剤，スランプ保持性能，経時変化，耐久性

This paper reports on the test results about slump and air content change over time and durability of the concrete with using high-early-strength cement and superplasticizer of enhanced slump retention performance. As a result, it is confirmed that when the superplasticizer with enhanced slump retention performance is applied, 1) slump reduction can be suppressed even under concrete temperature of exceeding 30 °C, 2) durability of the concrete is equivalent to the concrete using conventional superplasticizer.

Key Words: superplasticizer, slump retention performance, change over time, durability

1. はじめに

コンクリート構造物の品質を確保するためには、打設時におけるコンクリートのスランプを適切に管理することが重要である。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）のコンクリートへの利用を拡大する取組み¹⁾が多くなされている。しかし、このような混和材を使用したコンクリートについて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²⁾されており、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が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 上部工に多く用いられる早強ポルトランドセメントと混和材を用いたコンクリートを対象として、複数の高性能 AE 減水剤（A～D）を用いたスランプなどの経時変化試験³⁾を行い、スラン

プの保持性能が高い高性能 AE 減水剤があることを確認してきた。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、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保持性能を高めることが求められると推察される。そこで本報告では室内試験として、既報において使用した高性能 AE 減水剤を、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに使用し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、レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサにより製造したコンクリートのアジテータ車内で保管した経時変化試験を実施し、現場への適用性を検証した。また、それらのコンクリートについて凍結融解試験、促進中性化試験、塩水浸漬試験、表層透気試験、表面吸水速度試験、スケーリング試験を実施し、耐久性を確認した。

表-1 使用材料

材料		種類、物性など	記号	室内/実機	
水		上水道水	W	室内	
		地下水		実機	
セメント		早強ポルトランドセメント (密度3.13g/cm ³)	H1	C	
		早強ポルトランドセメント (密度3.14g/cm ³)	H2		
細骨材	砕砂	佐野産砕砂 (表乾密度2.73g/cm ³)	S1	S	
		佐野市会沢産砕砂 (表乾密度2.68g/cm ³)	S2		
	陸砂	神栖市波崎産 (表乾密度2.65g/cm ³)	S3		実機
		佐野市仙波産 (表乾密度2.58g/cm ³)	S4		
粗骨材	砕石	岩瀬産砕石2005 (表乾密度2.66g/cm ³)	G1	G	
		佐野市水木産砕石2005 (表乾密度2.71g/cm ³)	G2		
		佐野市仙波産砕石2005 (表乾密度2.71g/cm ³)	G3		
高性能AE減水剤		ポリカルボン酸エーテル系化合物(標準型)	SPA	SP	
		ポリカルボン酸エーテル系化合物(遅延型)	SPB		
		ポリカルボン酸エーテル系化合物(遅延型改良品1)	SPC		
		ポリカルボン酸エーテル系化合物(遅延型改良品2)	SPD		
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	

表-2 コンクリートの配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 kg/m ³											SP (C×%)		
			W	C		S				G						
				H1	H2	S1	S2	S3	S4	G1	G2	G3				
室内試験	40.0	43.0	160	400	400	-	784	784	-	-	-	1011	1011	-	-	0.7~1.2
実機試験	40.0	45.7	171	428	-	428	785	-	397	236	152	951	-	477	474	1.0~1.2

2. 実験概要

(1) 使用材料と配合

使用材料を表-1、コンクリートの配合を表-2 に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを用い、高性能AE減水剤はAからDと標記した4種類のポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分としたものであり、Aを基準としてアルファベットが進むにつれて保持性能が高まるように遅延成分と保持ポリマーが調整されている。そのほかの使用材料は、室内試験では砕砂と砕石を用い、実機試験ではプラントで通常使用されている砕砂と複数の陸砂を混合した細骨材と産地の異なる複数の砕石を混合した粗骨材を用いた。

室内試験で実施した配合は現場打ち PC 部材に多く使用されているコンクリートを想定し、設計基準強度が40N/mm² 程度の水セメント比 40%とした。実機試験も条件を揃えるために同一の水セメント比としたが、通常使用している細骨材に陸砂が用いられているため、粗粒率が小さくなり、同一スランプを得るために単位水量の増加が必要となった。そのため、室内試験に比べて約10kg/m³増加した。

(2) 製造方法

室内試験の練混ぜには強制二軸ミキサ (公称容積100L) を用いた。練混ぜ手順は次のとおりとした。最初にセメントと細骨材を投入し 10 秒間の空練りを行い、

その後、化学混和剤を混合した水を投入し 90 秒間練り混ぜた。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。実機による製造は以下の手順とした。セメントと細骨材を投入後、空練りを 10 秒間行い、化学混和剤と水を投入し 30 秒練り混ぜた。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した。前述の手順で 1m³ を 2 回練混ぜ、アジテータ車で混合してから出荷時のフレッシュ試験を行うとともに技術研究所まで運搬した。運搬時間は約 10 分程度であった。

(3) 経時変化試験

高性能 AE 減水剤 A から D の 4 種類を用いて、スランプの保持性能などを室内試験および実機試験により確認した。経時変化試験はスランプ、空気量、コンクリート温度について実施した。そのほかの試験として凝結試験とブリーディング試験を実施した。凝結試験は JIS A 1147 に準拠し、ブリーディング試験は φ150×300mm のブリキ製型枠を使用したコンクリートのブリーディング簡易試験方法 (試案) ⁴⁾ とした。練上がり直後の目標値はスランプで 18±2.5cm、空気量で 4.5±1.5%とした。練上がり直後のコンクリート温度は室内試験では 10, 20, 30, 35℃とした。10℃と 20℃は恒温室内で練混ぜと試験を実施し、30℃と 35℃については屋外で練混ぜ、それぞれの温度環境に設定した恒温室内に保管し試験を実施し

た。それぞれの試験時間までは練り舟にシートをかけた状態で静置し、試験直前にスコップによる切り返しを実施した。実機試験は室内試験と同項目について試験を行った。試験時間まではアジテータ車内にて低速撹拌した状態で保管し、試験直前に 30 秒間の高速撹拌を実施し採取し試験した。実機試験実施時の温度については外気温が 30℃程度の夏場を実施したが、想定していたよりもコンクリート温度が上がらず 29℃であった。

(4) 耐久性に関する試験

実機による経時変化試験と同一コンクリートで耐久性に関する試験に供する試験体を製作した。凍結融解試験は材齢 6 週より開始し、そのほかの項目については JIS A 1148 に準拠して行った。促進中性化試験は試験体を材齢 4 週まで水中養生を行ったのちに、材齢 23 週まで温度 20℃、相対湿度 60%の室内で乾燥を行い実施した。そのほかの項目については JIS A1153 に準拠して実施した。塩水浸漬試験は JSCE G 572 に準拠して実施した。表層透気試験、表面吸水速度試験については、900×900×200mm の床版模擬試験体の打設面で実施し、いずれも材齢 6 週で試験を行った。床版模擬試験体作製は屋根のある屋内で打設から養生までを行った。養生終了後は試験まで雨かきのある屋外に存置した。試験体は打設のタイミングにより 2 水準とし、コンクリートの荷下ろし直後（以下、経時前）と、スランプが 10cm 以下となるまで低下したタイミング（以下、経時後）とした。それぞれ養生剤を用いて荒均しと仕上げを行ったのちに養生マットによる湿潤養生を 3 日間行った。スクーリング試験は、試験終了後の床版模擬試験体より φ150mm のコアを採取し、打設面を試験面として実施した。試験体のサイズ以外の項目については ASTM C 672 に準拠して行った。

3. 実験結果

(1) 経時変化試験

表-3 に練り上がり直後のフレッシュ性状を示す。練り直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。練り温度についてもおおむね想定していた温度であった。図-1, 2 にスランプと空気量の試験結果を示す。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た。スランプの結果より、練り温度が 10℃の条件では混和剤 B, C, D 練り温度が 20, 30, 35℃および実機試験では混和剤 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,

表-3 化学混和剤の使用量と練り上がり直後のフレッシュ試験結果

種類	混和剤の種類	化学混和剤の使用量		スランプ (cm)	空気量 (%)	練り温度 (℃)
		SP (C×%)	AE (C×%)			
室内 10℃	A	0.7	0.0005	19.0	4.1	11.0
	B	1.0	0.0010	20.5	4.2	11.0
	C	1.2	0.0080	19.0	4.5	11.0
	D	1.1	0.0070	19.5	4.2	11.0
室内 20℃	A	0.8	0.0010	22.0	4.6	21.1
	B	0.8	0.0010	20.5	4.7	21.4
	C	0.8	0.0020	19.0	4.9	22.0
	D	0.8	0.0020	19.5	3.5	21.9
室内 30℃	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	0.0020	19.5	3.4	33.2
	D	0.9	0.0025	19.0	4.0	33.0
室内 35℃	A	1.0	0.0040	19.0	5.4	36.7
	B	1.0	0.0060	20.0	5.5	36.8
	C	1.0	0.0060	19.5	4.1	35.1
	D	1.0	0.0060	21.0	5.7	36.6
実機 29℃	A	1.2	0.0010	20.0	3.8	29.0
	B	1.1	0.0010	19.0	4.9	29.0
	C	1.2	0.0030	18.5	4.5	29.0
	D	1.2	0.0030	19.5	4.5	29.0

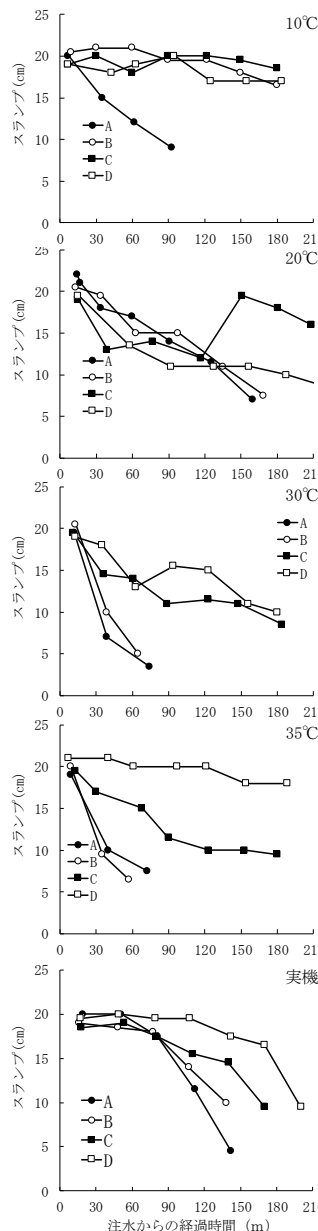


図-1 スランプの試験結果

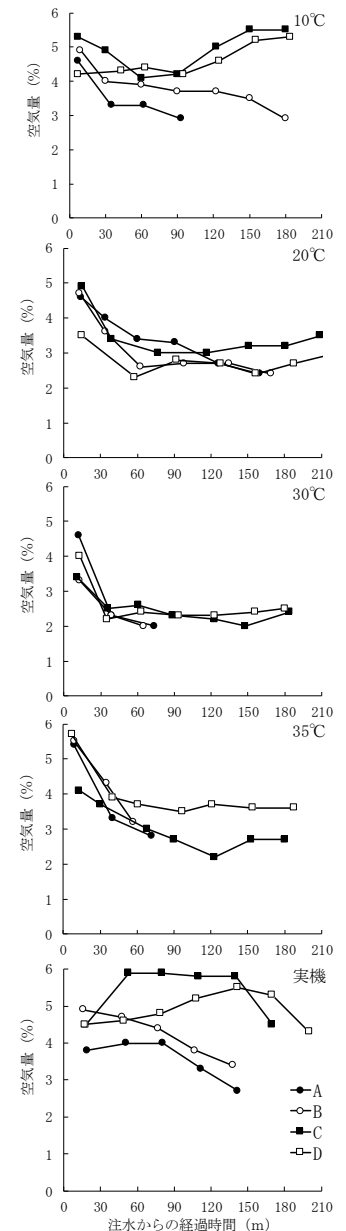


図-2 空気量の試験結果

表-4 ブリーディングと凝結試験結果

種類	混和剤の種類	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)	凝結 (h:min)	
			始発	終結
10	A	0.00	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	0.00	3:20	4:35
	B	0.00	5:05	6:10
	C	0.00	7:00	8:15
	D	0.00	10:10	11:55
35	A	0.00	3:35	4:35
	B	0.00	5:00	6:05
	C	0.00	7:30	8:35
	D	0.00	11:00	12:05
実機	A	0.01	3:51	4:42
	B	0.01	4:31	5:33
	C	0.00	5:20	6:15
	D	0.03	6:07	6:59

Dではいずれの環境温度でもスランブの低下を抑制したものと考える。環境温度 10℃では混和剤 B でもスランブの低下抑制効果が見られた。空気量は、おおむね同様な低下傾向を示したが、練上り温度 10℃と実機試験のときの混和剤 C, D で空気量の低下が少ない。これについては表-3 に示すように空気量調整剤がほかと比較して若干多かったことが影響しているものと考え。ブリーディング試験と凝結試験の結果を表-4 に示す。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⁵⁾は水セメント比が 40%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 160~185kg/m³の範囲でブリーディング量は 0.02~0.09cm³/cm²となっている。練上り温度 20℃において、混和剤 A を用いた場合は 0.05 cm³/cm²、混和剤 B では 0.03 cm³/cm²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 0.13cm³/cm²、D で 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、スランブが保持されブリーディング時間が伸びたことによるものと考え。練上り温度 30℃、35℃および実機試験において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ごく少量であった。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℃と比較して温度が低い条件である 10℃では 20℃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℃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⁶⁾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⁷⁾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ている。凝結試験は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℃に対して、30℃、35℃実機試験で凝結は早まり、10℃では遅延した。D では練上り温度 20℃に対して、30, 35, 10℃が遅延した。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。D では添加量が 20℃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考え。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。

(2) 耐久性に関する試験

凍結融解試験の結果を図-3 に示す。高性能 AE 減水剤 A と B では 300 サイクル時の相対動弾性係数が 60%以下となった。表-3 より、化学混和剤 A, B を用いた場合には AE 剤の使用量が少ない。コンクリート中のエントレインドエアの量は AE 剤の量に依存する⁸⁾ことが示されており、本実験では化学混和剤 A, B ではエントレインドエアが少なくなっているものと推察される。すなわち、化学混和剤 A, B を用いた場合には、AE 剤の使用量が少なくエントレインドエアが減少していることにより、凍結融解抵抗性が低くなり、化学混和剤 C, D を用いた場合には、AE 剤の使用量は増加するものの、凍結融解抵抗性に対してはより有利に働いているものと推察される。促進中性化試験を図-4 に示す。促進中性化試験の結果では促進開始より 8 週までの範囲においてはいずれの配合にも差が見られなかった。塩水浸漬試験の結果を図-5 に示す。いずれの化学混和剤を使用した場合でもおおむね同様の結果が得られている。以上より、本実験で用いた高性能 AE 減水剤においては、中性化および塩化物の透過性への影響は同程度であった。表層透気試験と表面吸水速度試験の結果を図-6 および図-7 に示す。表層透気試験と表面吸水速度試験のどちらにおいても、経時前と経時後で値が異なることがわかる。本報

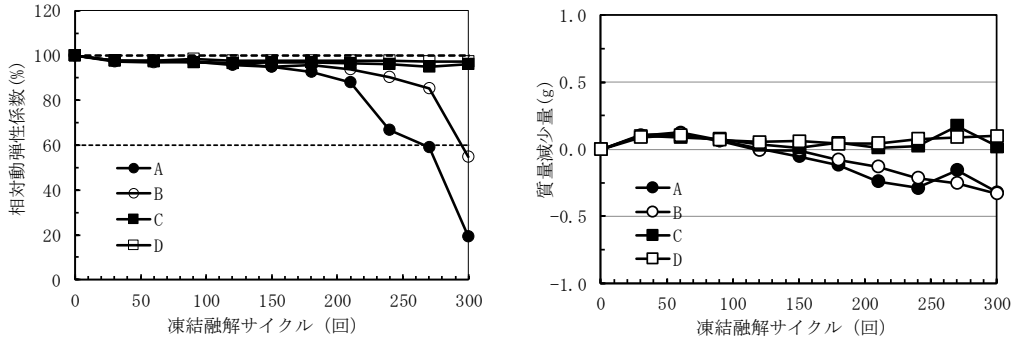


図-3 凍結融解試験結果

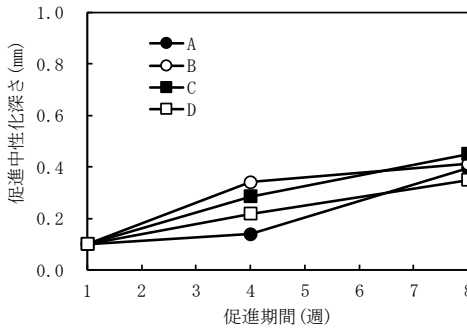


図-4 促進中性化試験結果

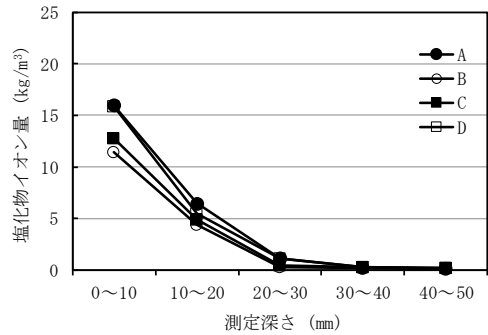


図-5 塩水浸漬試験結果

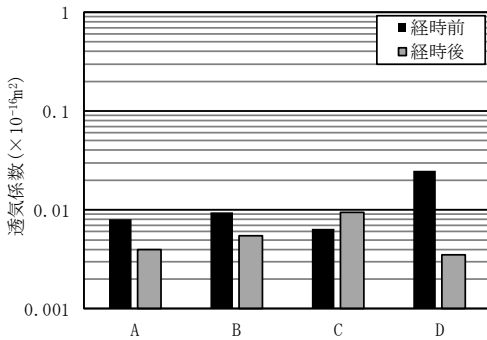


図-6 表層透気試験結果

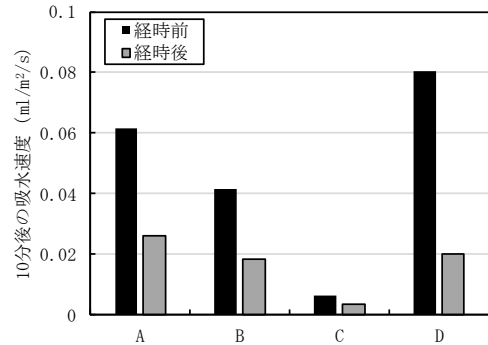


図-7 表面吸水試験結果

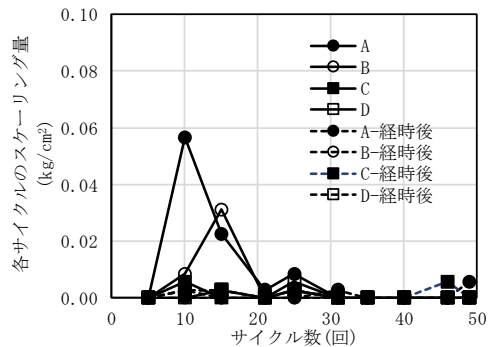
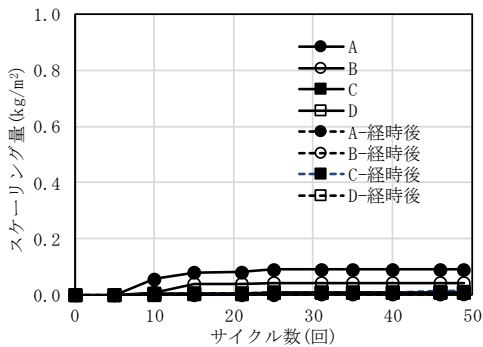


図-8 スケーリング試験結果

告では、高性能 AE 減水剤 C を用いた場合を除き、打設完了が遅い場合において、透気係数が小さくなり、表面吸水速度は遅くなった。この原因としては経時前の試験体では、ブリーディングの影響により、表層部分の水セメント比が大きくなることによるものと推察している。

図-8 にスケーリング試験の結果を示す。試験終了後の累計スケーリング量はいずれの配合においても少なかった。また、経時前に打設した試験体のうち、高性能 AE 減水剤 A および B を用いた場合では累計スケーリング量が多くなっていることがわかる。これは前述の凍結融

解試験の結果と同様に AE 剤の使用量が少なくなること
でエントレインドエアが減少していることによるものと
推察している。また、経時前後で比較すると、経時後に
打設した試験体のうち高性能 AE 減水剤 A および B を
使用した配合ではスケーリング量が少なくなっているこ
とがわかる。スケーリング量は試験を行う面により異なる
ことが高橋ら⁹⁾により指摘されており、それによると
試験面が打設面であるときスケーリングの劣化が激しく、
その理由としてはブリーディングの影響を挙げている。
本実験では、試験面はいずれも打設面であり、ブリーデ
ィングの影響が含まれ、経時前に打設した試験体に比べ、
経時後に打設した試験体はブリーディングが発生する時
間が短く、影響を受けにくいものと考えられる。以上の
ことから、経時後に打設した試験体では、スケーリング
量が少なくなったと推察する。各サイクルでのスケーリ
ング量をみると、サイクル初期にスケーリング量が多い。
高橋らの報告⁹⁾においてもサイクル初期でスケーリング
量が多くなっており、ブリーディング層が初期に剥離し
たためと考察している。本試験においても同様にブリー
ディング層がサイクル初期に剥離したと推察される。

4. まとめ

早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートに
対してスランプの保持性能を高めた高性能 AE 減水剤を
適用し、スランプや空気量の経時変化および耐久性に関
する試験を実施し、以下の結果を得た。

- ① 練上り温度が 30、35℃であっても高いスランプ
保持性能を有した。
- ② いずれの化学混和剤を用いた場合でもブリーデ
ィングに大きな差はみられなかった。
- ③ スランプの保持性能を高めた高性能 AE 減水剤の
中には、練上り温度が 30、35℃の条件でも練上
り温度 20℃と比較して遅延するものがあつた。
- ④ 実機試験においても、比較的高い外気温の条件
ならびに実施工に近い条件でスランプ保持性能
を発揮することが確認された。
- ⑤ スランプ保持成分を高めた化学混和剤を用いた
コンクリートの促進中性化試験、塩水浸漬試験
の結果は、従来の高性能 AE 減水剤を用いたコン
クリートと同程度の結果が得られた。
- ⑥ AE 剤の使用量が凍結融解抵抗性に影響を及ぼす
こと、ブリーディングの変化が表層品質に関する
表層透気試験、表面吸水速度試験、スケーリ
ング試験に影響を及ぼす可能性が示唆された。

実構造物への適用にあたっては施工計画の段階
で注意する必要があると考えられる。

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したい。

参考文献

- 1) 佐々木亘，石澤正大，基哲義，谷口秀明：場所打ち
PC 橋への適用を想定したフライアッシュコンクリ
ートの強度発現，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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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](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）
- 7) 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.
- 8) 日本コンクリート工学会：コンクリート中の気泡の
役割・制御に関する研究委員会報告書，pp.7-9，
2016.6
- 9) 高橋幹雄，宮里心一：RILEM CDF と ASTM C
672 の供試体形状がスケーリングに及ぼす影響，コ
ンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.875-
880，2010