

論文 各種混和剤の使用率により流動性を付与したコンクリートのフレッシュ性状に関する一考察

萩谷俊祐^{*1}・中田善久^{*2}・平野修也^{*3}・湯本哲也^{*4}

要旨:本研究は、各種混和剤の使用率がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を明らかにするために、3種類の化学混和剤の使用率を変えて流動性を付与したコンクリートのフレッシュ性状について検討したものである。その結果、普通強度レベルによる化学混和剤の使用率を変えて流動性を付与させようとする化学混和剤の種類および骨材の種類により達成可能な目標スランプフローの設定値が大きく変わる。また、目標スランプフローを満足したコンクリートにおけるスランプフローの経時変化、ブリーディング量、凝結時間は、化学混和剤の種類、使用率および骨材の種類によって大きく異なる傾向を示した。

キーワード: 高流動コンクリート、高性能AE減水剤、増粘剤、AE減水剤、流動性、フレッシュ性状

1. はじめに

我が国において高流動コンクリートは、1986年に「ハイパフォーマンスコンクリート」¹⁾として岡村博士が提唱したものが始まりである。このコンクリートは、打込み作業の合理化や高密度配筋構造物の充填性の改善などを目的に高い耐久性が得られるものであり、多量のフライアッシュや高炉スラグ微粉末を混入させて材料分離抵抗性を有して高性能AE減水剤により流動性を付与したものである。この頃に締固め不要コンクリートである高流動コンクリートの研究開発が盛んに行われ、1995年にJIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」の中に高性能AE減水剤が追加された。このような背景から1997年に日本建築学会「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説」²⁾が制定され、その後、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」³⁾に新設された。

一方、2000年の建築基準法の改正により建築分野において高強度コンクリートの使用が主流になり、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材を用いたものよりもセメントのみによる高強度コンクリートでかつ高流動コンクリートが用いられるようになっていった。この状況の中で2016年度日本建築学会大会において「高流動コンクリートの活用に関する課題と展望 ―高流動指針の改定に向けて―」⁴⁾研究協議会が開催された。ここで、議論となったのは、JASS 5や指針類に該当しないスランプ23cm以上でスランプフロー55cm以下の中間領域の流動性を付与させたコンクリートの位置付けであり、また、高性能AE減水剤と増粘剤の1液による混和剤を用いたコン

クリートをどのように取扱うかという点であった。これらの点を考慮すると、高強度コンクリートのように、比較的、粉体量が大きい普通強度レベルのコンクリートにどのように流動性を付与できるかは不明である。

そこで、本研究は、各種混和剤の使用率がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を明らかにするために、3種類の化学混和剤の使用率を変えて流動性を付与したコンクリートのフレッシュ性状について検討したものである。ここでは、W/C=55%および目標スランプ21cmを基準調合とし、目標スランプフロー40cm、50cmおよび60cmの流動性を付与できるか否かについて、化学混和剤の使用率により調整し、その性状を調べたものである。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

ここでは、3種類の混和剤を用いた同一W/C=55%の目標スランプ21cmによるコンクリートの基準調合に対して混和剤の使用率を変化させて、流動性を高めたフレッシュ性状について調べた。化学混和剤の種類は、高性能AE減水剤、高性能AE減水剤(増粘剤含)およびAE減水剤(高機能型)の3種類とし、目標スランプ(以下、SLとする)21cmの基準調合よりこれらの使用率を変えて目標スランプフロー(以下、SFとする)を40cm、50cmおよび60cmとしたときのフレッシュ性状について検討した。また、混和剤の使用率の調整により目標SFが満足したコンクリートのフレッシュ性状として、フレッシュコンクリートの状態、スランプフローの経時変化、ブリーディング量および凝結時間について検討を行った。

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

*3 株式会社フローリック 修士 (工学) (正会員)

*4 日本大学 理工学部客員研究員 修士 (工学) (正会員)

2.2 コンクリートの使用材料

コンクリートの使用材料を表－1に示す。使用した細骨材は、骨材A(細骨材に中目砂および石灰砕砂の2種類を用い、粗骨材に石灰砕石および硬質砂岩砕石の2種類を用いたもの)および骨材B(細骨材に陸砂を用い、粗骨材に硬質砂岩砕石を用いたもの)の2水準とした。なお、骨材Aは、細骨材および粗骨材ともに、2種類の骨材が絶対容積で等量となるように混合して使用した。

実験に使用した化学混和剤の主成分を表－2に示す。化学混和剤は、いずれもJIS A 6204-2011「コンクリート用化学混和剤」の標準形I種によるものである。以下、本論文において、高性能AE減水剤をSP、高性能AE減水剤(増粘剤含)をSP+増粘剤、AE減水剤(高機能型)をAE(高機能)と略記する。なお、化学混和剤の使用率の上限値は、メーカーの推奨値を参考として、SPのとき2.5%/C、SP+増粘剤のとき3.0%/C、AE(高機能)のとき2.0%/Cとした。

2.3 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表－3に示す。コンクリートの調合は、いずれの化学混和剤の場合も、水セメント比を55%とした。これは、一般的なレディーミクストコンクリートにおいて呼び強度27程度の普通強度レベルのものを想定している。

2.4 試験項目および方法

試験項目および方法を表－4に示す。コンクリートは、容量30リットルの水平二軸形強制練りミキサを用い、練混ぜた。練混ぜ手順は、化学混和剤の種類ごとに変化させた。まず、SPとSP+増粘剤に関しては、「G+S/2+C+S/2→10秒間練混ぜ→W+Ad→90秒間練混ぜ→排出」とした。また、AE(高機能)に関しては、「G+S/2+C+S/2→10秒間練混ぜ→W+Ad→90秒間練混ぜ→5分静置→30秒間練混ぜ→排出」とした。

試験項目は、スランブ試験、スランブフロー試験、空気量試験、目視試験、ブリーディング量および凝結試験とした。また、目標SFを満足した調合について、スランブフローの経時変化(45分および90分)を調べた。また、経時変化の測定は、練り舟に静置したコンクリートを測定直前に切り返してから行った。ここで、目視試験は、コンク

リートの材料分離抵抗性を確認するために、JASS 5 16.3品質a.に記述されている項目について、目視Iとして、SL, SF試験後のコンクリートの中央部における粗骨材の偏在の有無を目視により判定した。また、目視IIとして、SL, SF試験後のコンクリートの周辺部におけるセメントペーストや遊離した水の偏在の有無を目視により判定し、

表－1 使用材料

材料	記号	種類・品質・物性値
水	W	上水道水 茨城県つくば市
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度:3.15g/cm ³ ,比表面積:3,300cm ² /g
骨材A	細骨材	S ₁ 中目砂 千葉県木更津市 表乾密度:2.62g/cm ³ ,吸水率:1.27%,粗粒率:2.42
		S ₂ 石灰砕砂 福岡県北九州市 表乾密度:2.68g/cm ³ ,吸水率:0.56%,粗粒率:2.47
	粗骨材	G ₁ 石灰砕石2005 埼玉県秩父郡横瀬町 表乾密度:2.69g/cm ³ ,吸水率:0.53%,実積率:60.0%
		G ₂ 硬質砂岩砕石2005 埼玉県秩父郡小鹿野町 表乾密度:2.72g/cm ³ ,吸水率:0.58%,実積率:60.0%
骨材B	細骨材	S ₃ 陸砂 栃木県栃木市尻内町 表乾密度:2.61g/cm ³ ,吸水率:2.14%,粗粒率:2.75
	粗骨材	G ₃ 硬質砂岩砕石2005 栃木県栃木市尻内町 表乾密度:2.64g/cm ³ ,吸水率:1.24%,実積率:59.4%

表－2 実験に使用した化学混和剤の主成分

種類	主成分
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物
高性能AE減水剤(増粘剤含)	ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤系特殊増粘剤の複合体
AE減水剤(高機能型)	リグニンスルホン酸塩オキシカルボン酸塩ポリカルボン酸系化合物

表－4 試験項目および方法

試験項目	試験方法
スランブ試験	JIS A 1101:2005
スランブフロー試験	JIS A 1150:2007
空気量試験	JIS A 1128:2005
目視I	目視による粗骨材の偏在の有無 SL,SF試験後のコンクリートの中央部における粗骨材の偏在の有無を目視により判定
目視II	目視によるセメントペーストや遊離した水の偏在の有無 SL,SF試験後のコンクリートの周辺部におけるセメントペーストや遊離した水の偏在の有無を目視により判定
ブリーディング試験	JIS A 1123:2012
凝結試験	JIS A 1147:2007

表－3 コンクリートの調合

骨材の種類	W/C (%)	目標SL (cm)	目標空気量 (%)	s/a (%)	化学混和剤の種類	単位量 (kg/m³)							
						W	C	S ₁	S ₂	S ₃	G ₁	G ₂	G ₃
骨材A	55	SL=21±1	4.5±1.5	48.6	SP	175	318	429	444	-	470	473	-
				48.6	SP+増粘剤	175	318	429	444	-	470	473	-
				47.4	AE(高機能)	185	336	408	422	-	470	473	-
骨材B				48.4	SP	175	318	-	-	873	-	-	943
				48.4	SP+増粘剤	175	318	-	-	873	-	-	943
				49.2	AE(高機能)	185	336	-	-	899	-	-	895

表－5 目標SFを満足したコンクリートのフレッシュ試験結果

骨材の種類	化学混和剤の種類	W/C (%)	目標SL 目標SF (cm)	目標空気量 (%)	化学混和剤の使用率(‰/C)	練上がり直後のフレッシュ性状			
						SL (cm)	SF (cm)	空気量 (%)	CT (℃)
骨材A	SP	55	21±1	4.5±1.5	0.90	21.5	37.0	3.8	21.0
			40±2		1.00	23.0	41.0	3.5	21.0
			50±2		1.25	24.0	48.0	4.0	21.0
	SP+増粘剤		21±1		0.95	22.0	39.5	4.5	21.0
			40±2						
			50±2						
	AE(高機能)		60±2		1.25	24.5	50.5	4.1	21.0
			21±1		1.60	26.5	60.0	4.0	21.0
			40±2		0.85	21.5	37.5	4.1	21.0
骨材B	SP	55	21±1	4.5±1.5	1.00	22.5	41.0	4.3	21.0
			40±2		1.25	21.0	34.0	4.2	21.0
			50±2		1.45	21.5	39.0	4.3	21.0
	SP+増粘剤		21±1		1.15	21.0	37.5	5.3	21.0
			40±2		1.25	22.5	40.0	5.5	21.0
			50±2		1.50	24.0	49.5	5.5	20.0
	AE(高機能)		21±1		1.50	21.0	33.5	4.7	21.0

目標SF (cm)	骨材A									骨材B								
	SP			SP+増粘剤			AE(高機能)			SP			SP+増粘剤			AE(高機能)		
基準調合 (SL=21)	0.90 ‰C			0.95 ‰C			0.85 ‰C			1.25 ‰C			1.15 ‰C			1.50 ‰C		
SF=40	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II
	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○
SF=50	1.00 ‰C			0.95 ‰C			1.00 ‰C			1.45 ‰C			1.25 ‰C			2.00 ‰C		
	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II
SF=60	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	○	○	○	○	○	—	—	—
	1.25 ‰C			1.25 ‰C			1.5 ‰C			1.75 ‰C			1.50 ‰C			—		
SF=60	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II
	×	○	×	○	○	○	—	—	—	—	—	—	×	○	○	—	—	—
SF=60	1.60 ‰C			1.60 ‰C			—			—			1.75 ‰C			—		
	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II	目標値	目視I	目視II

目標値：目標SFの満足の可否，目視I：目視による粗骨材の偏在の有無，目視II：目視によるセメントペーストや遊離した水の偏在の有無

図－1 目標SFごとのフレッシュコンクリートの状態

評価した。

3. 結果および考察

3.1 目標SFごとのフレッシュコンクリートの状態

目標SFを満足したコンクリートのフレッシュ試験結果を表－5に示す。目標SFごとのフレッシュコンクリートの状態を図－1に示す。この中で、目標SFの満足の可否、目視による粗骨材の偏在の有無および目視によるセメントペーストや遊離した水の偏在の有無をいずれも○，×によって表記している。また、化学混和剤の使用率を表記し、目標SFを満足しなかったものあるいは目視評価により×になったものも参考値として記載した。

化学混和剤の使用率は、混和剤の種類にかかわらず目標SFが大きくなるほど増加する傾向を示し、骨材Aよりも骨材Bの方が大きくなる傾向を示した。これは、基準調合(W/C=55%，目標SL=21cm)から化学混和剤の使用率のみで流動性を付与させるために、当然の結果といえる。ま

た、骨材の種類により化学混和剤の使用率が大きく変化することも考えられるが、骨材の物理的性質からはこの原因が断定しにくい。

基準調合(W/C=55%，目標SL=21cm)から化学混和剤の使用率のみで流動性を付与させて目標SFを満足できたものは、骨材Aの場合、SPにおいて目標SL=50cmまでであり、SP+増粘剤において目標SF=60cmまでであり、さらにAE(高機能)において目標SF=40cmまでであった。これは、基準調合の単位セメント量などの調合条件と各混和剤の減水効果と性質の影響によって目標SFの設定値を満足できるかに大きな差が生じたと考えられる。また、骨材Bの場合、SPにおいて目標SF=40cmまでであり、SP+増粘剤において目標SF=50cmまでであり、さらに、AE(高機能)は、いずれの目標SFを満足できなかった。これは、前述したように、基準調合の単位セメント量などの調合条件と各混和剤の減水効果だけでなく、使用される骨材の種類によってコンクリートに流動性を付与できるかの

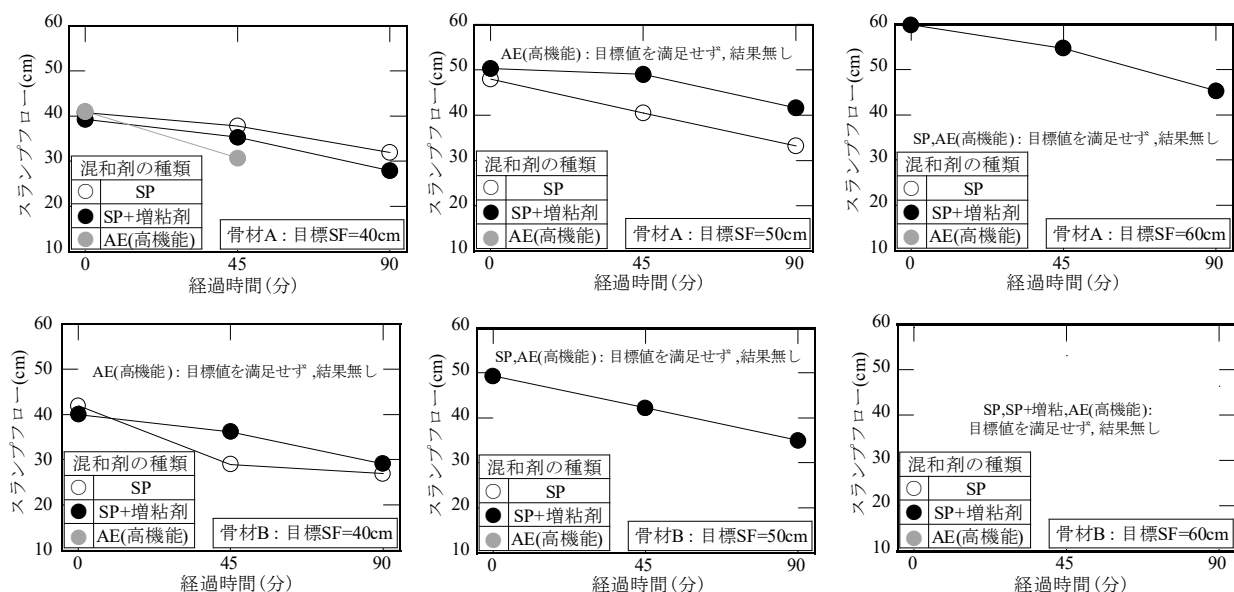


図-2 目標SFを満足したコンクリートにおける経過時間とスランプフローの関係

大きな要因であることであることを示唆している。また、このW/C程度の単位セメント量において、目標SFを大きくするのであれば、3種類の化学混和剤の中でSP+増粘剤が有効であるといえる。

目視Ⅰ(目視による粗骨材の偏在の有無)および目視Ⅱ(セメントペーストや遊離した水の偏在の有無)が大きく変化したのは、骨材Aの場合、目標SF=60cmにおけるSPとSP+増粘剤のときであった。このときの化学混和剤の使用率は、同じであったにもかかわらず目標SFをSPは満足できず、目視Ⅱを満足できなかった。これは、この程度の単位セメント量であるとSPにおいて材料分離抵抗性を保持できず目視Ⅱを満足できなかったがSP+増粘剤において増粘剤の影響により材料分離抵抗性も高められたと考えられる。同様にこの傾向が骨材Bの場合、目標SF=50cmのときに見られた。また、骨材Aの場合、AE(高機能)において目標SF=50cmのときに前述と同様な結果が見られた。これは若干、他のSPやSP+増粘剤に比べて単位セメント量が大いにもかかわらず、減水効果が劣り、材料分離抵抗性も確保できなかったためと考えられる。さらに、骨材Bの場合、目標SF=40cmのときにこの現象が見られた。

以上のことより、普通強度レベルにおいて化学混和剤の使用率を変えて流動性を付与させようとする化学混和剤の種類および骨材の種類により目標SFの設定値が大きく変わるといえる。

3.2 目標SFを満足したコンクリートにおける経過時間とスランプフローの関係

目標SFを満足したコンクリートにおける経過時間とスランプフローの関係を図-2に示す。

目標SFを満足したコンクリートにおけるスランプフ

ローの経時変化は、骨材Aの場合、目標SF=40cmのときにAE(高機能)、SP+増粘剤、SPの順に小さくなる傾向を示し、目標SF=50cmのときにSP、SP+増粘剤の順に小さくなる傾向を示した。これは、目標SF=50cmを満足するために必要な化学混和剤の使用率が等しいことより、各混和剤の減水効果と性質の影響が顕著に表れた結果と考えられる。また、目標SF=60cmのときは、90分において14.6cm変化した。これは、前述した化学混和剤の使用率と密接な関係を示したものであり、各混和剤のスランプ保持性を考慮すれば妥当な結果と考えられる。

骨材Bの場合、目標SF=40cmのときにSP+増粘剤、SPの順に小さくなる傾向を示し、目標SF=50cmのときに90分において、14.3cm変化した。これは、先に述べた通り、化学混和剤の使用率と密接な関係があるといえる。

以上のことより、目標SFを満足したコンクリートにおけるスランプフローの経時変化は、化学混和剤の種類や使用率によって大きく異なる傾向を示し、SPおよびSP+増粘剤の経時変化は、15.0cmとなる結果となった。

3.3 目標SFを満足したコンクリートにおける混和剤ごとのブリーディング量

目標SFを満足したコンクリートにおける混和剤ごとのブリーディング量を図-3に示す。ブリーディング量は、高流動指針²⁾において $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下と定められている値を図中に表記した。

目標SFを満足したコンクリートにおける混和剤ごとのブリーディング量は、骨材Aの場合、目標SF=40cmのときに、AE(高機能)、SP+増粘剤、SPの順に小さくなる傾向を示し、目標SF=50cmのときにSP、SP+増粘剤の順に小さくなる傾向を示した。目標SF=40cmのときのAE(高機能)が混和剤の使用率が小さいにもかかわらず、他の

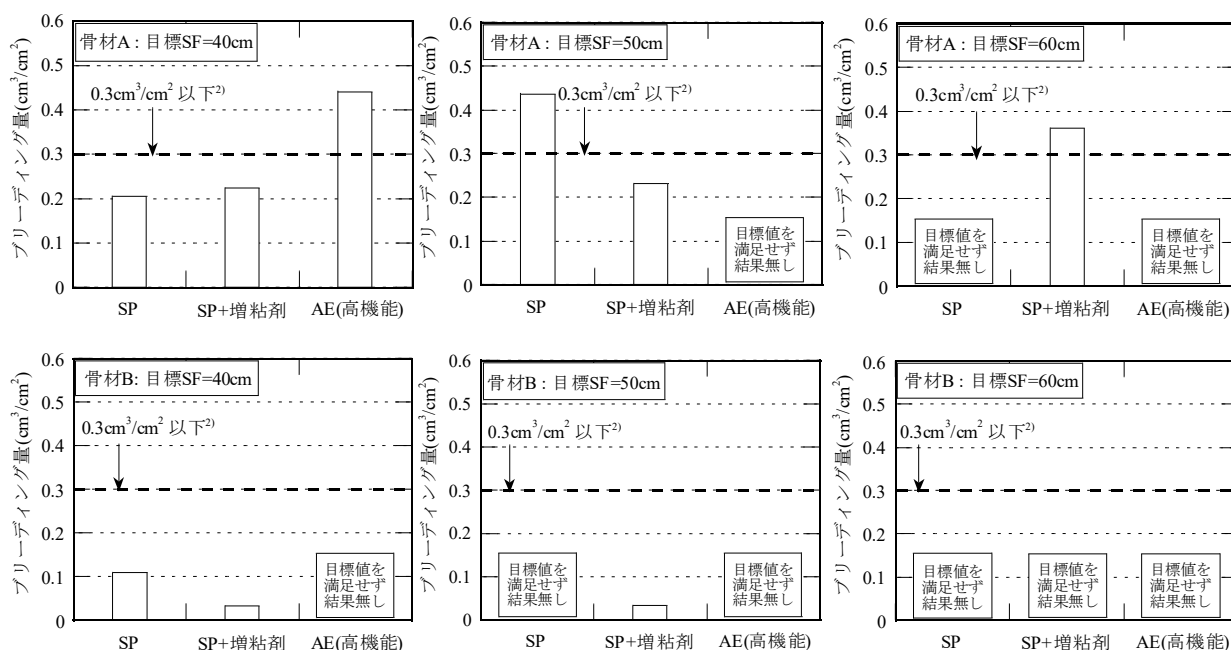


図-3 目標SFを満足したコンクリートにおける混和剤ごとのブリーディング量

混和剤を使用したコンクリートよりもブリーディング量が多くなったのは、他の調合に比べて単位水量が大きく単位細骨材量が小さかったことが影響していると考えられる。また、目標SF=60cmのときは、SP+増粘剤において $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上となった。これは一般的に、化学混和剤の使用率と後述する凝結時間との関係が考えられるが、目標SF=50cmのSPおよびSP+増粘剤の使用率が同じであると考え、SP+増粘剤が材料分離抵抗性を高めたことによると考えられる。さらに、目標SF=60cmが $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上になったことは、一定以上の流動性を高められたとしても目視Ⅱでは判別できない材料分離抵抗性が不足している可能性が高いと考えられる。

骨材Bの場合、目標SF=40cmのときに、SP、SP+増粘剤の順に小さくなる傾向を示し、目標SF=50cmのときに、SP+増粘剤において $0.03\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となった。桜井ら⁹⁾によると、配(調)合中の単位水量が多いほど、水を拘束できる固体材料が少ないほど自由水が多くなるため、ブリーディングが多くなることが報告されている。これを踏まえ、骨材Aと比較すると、目標SFを満足しにくい骨材Bのほうが骨材やセメントなどの固体粒子間に拘束される水の量が全般的に多いと思われる。

以上のことより、目標SFを満足したコンクリートにおけるブリーディング量は、化学混和剤の種類、使用率および骨材の種類によって大きく異なる傾向を示した。

3.4 目標SFを満足したコンクリートにおける混和剤ごとの凝結時間

目標SFを満足したコンクリートにおける混和剤ごとの凝結時間を図-4に示す。

目標SFを満足したコンクリートにおける凝結時間は、骨材Aの場合、目標SF=40cmのときにAE(高機能)、SP+増粘、SPの順に早くなる傾向を示し、目標SF=50cmのときにSP、SP+増粘剤の順に早くなる傾向を示した。また、目標SF=60cmのときのSP+増粘剤は目標SF=50cmと同等程度の時間であった。目標SF=40cmのときのAE(高機能)は、使用率が小さいにもかかわらず長くなったのは、他の調合に比べて単位水量が大きく、単位細骨材量が小さかったことが凝結時間の遅延に影響したと考えられる。また、目標SF=40cmおよび50cmのときのSPおよびSP+増粘剤が同程度の時間であったのは、混和剤の使用率と考えられる。しかし、目標SF=60cmのSP+増粘剤の凝結時間が同程度であったことを考えると、この程度の混和剤の使用率であればこの基準調合に対して凝結時間は、SPおよびSP+増粘剤の影響は小さいものと思われる。

骨材Bの場合、目標SF=40cmのときに、SP、SP+増粘剤の順に早くなる傾向を示し、目標SF=50cmのときのSP+増粘剤のときのSP+増粘剤は目標SF=40cmと同程度の時間であった。この結果からすると骨材Aで述べた混和剤使用率との関係の考察と大きく異なるものとなるが、この影響は前述した骨材やセメント粒子などの固体粒子間の水の量の違いによるものと思われる。

以上のことより、目標SFを満足したコンクリートにおける凝結時間は、骨材の種類と混和剤の使用率によって大きく変わるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、各種混和剤の使用率がコンクリートのフ

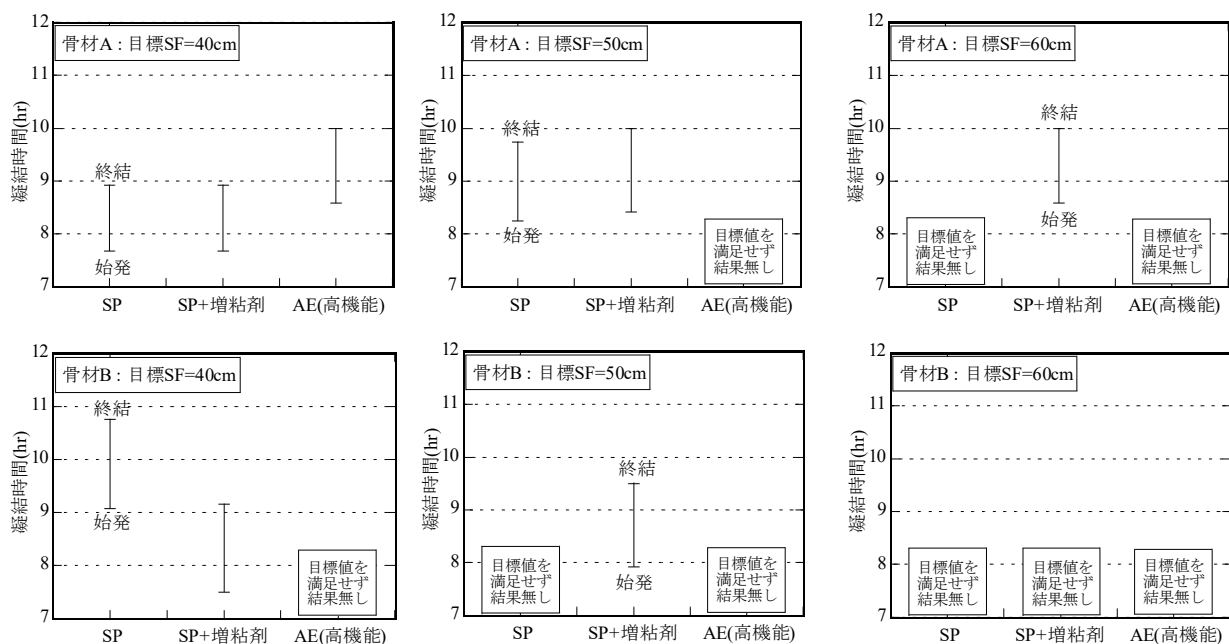


図-4 目標SFを満足したコンクリートにおける混和剤ごとの凝結時間

フレッシュ性状に及ぼす影響を明らかにするために、3種類の化学混和剤の使用率を変えて流動性を付与したコンクリートのフレッシュ性状について検討したものである。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 普通強度レベルにおいて化学混和剤の使用率を変えて流動性を付与させようとすると化学混和剤の種類および骨材の種類により達成可能な目標SFの設定値が大きく変わる。
- (2) 目標SFを満足したコンクリートにおけるスランプフローの経時変化は、化学混和剤の種類や使用率によって大きく異なる傾向を示し、SPおよびSP+増粘剤は経時変化が小さい。
- (3) 目標SFを満足したコンクリートにおけるブリーディング量は、化学混和剤の種類、使用率および骨材の種類によって大きく異なる傾向を示した。
- (4) 目標SFを満足したコンクリートにおける凝結時間は、骨材の種類と混和剤の使用率によって大きく変わる。

以上より、化学混和剤の使用率のみで流動性を付与させる場合、材料分離抵抗性を確保するためにはSP+増粘剤が有効であった。また、他の化学混和剤の場合でも、調合を修正することで目標SF=60cmまで作成することが可能であることが示唆された。今後は、本実験の基準調合において、化学混和剤の使用率による調整のみでは目標SFを満足しなかったコンクリートについて、調合の修正方法と

そのコンクリートのフレッシュ性状に関する検討を行う予定である。

謝辞

本実験の実施に際し、株式会社フローリックおよび株式会社和田砂利商会より、多大なるご協力を得ました。また、本実験を行うに当たり、日本大学理工学部建築学科中田研究室・菊地貴志君、小林浩隆君より協力を得た。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 1993.9
- 2) 日本建築学会: 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針 (案)・同解説, 1997.1
- 3) 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, 2015.7
- 4) 日本建築学会: 高流動コンクリートの活用に関する課題と展望-高流動指針の改定に向けて, 2016.8
- 5) 桜井邦明, 丸山久一, 近松竜一: 高性能AE減水剤による分散効果と流動性を考慮したブリーディング水量の予測モデル, 土木学会論文集E2, Vol.70, No.2, pp.166-179, 2014