

早強材を添加した環境負荷低減型コンクリートの 強度発現性に及ぼす環境温度の影響

技術本部
技術本部

技術研究所
技術研究所

椎野碧
中瀬博一

概要: 高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を用いた環境負荷低減型コンクリートは初期の強度発現が遅延する傾向にあるため、環境温度 20℃において、早強材を用いて初期強度発現性を向上させた早強型混和材コンクリートを開発した。ただし、初期強度発現性は環境温度の影響を受けやすいため、環境温度による性状の変化を確認しておく必要がある。そこで、環境温度をパラメータとして圧縮強度試験を実施した。その結果、高温環境下では初期強度発現性が向上し、低温環境下では僅かに低下することが確認された。

Key Words: 混和材コンクリート、初期強度発現性、環境温度、間詰めコンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物には耐久性向上、長寿命化、環境負荷の低減および塩化物イオン浸透等の複合劣化によるASR抑制対策などが求められており、高炉スラグ微粉末(以降、BFSと称す)やフライアッシュ(以降、FAと称す)などの混和材を用いたコンクリート(以降、混和材コンクリートと称す)の需要が高まると考えられる^{1),2)}。混和材コンクリートはプレキャストPC床版を用いた床版取替工事でも適用が進んでおり、場所打ちとなる間詰めコンクリートにも混和材コンクリートを用いることにより、構造体としての高耐久化が期待できる。しかし、混和材コンクリートは初期の強度発現が遅く、促進養生が困難な場所打ちコンクリートに用いた場合、生産性が低くなる傾向にあるため、混和材コンクリートの早期強度発現の向上が望まれる³⁾。

こうした背景から、これまでに筆者らは打設時の雰囲気温度および養生温度(以降、環境温度と称す)を20℃とした場合、PC床版間詰め部に場所打ちされる混和材コンクリートに早強材を添加することで、材齢3日で設計基準強度50N/mm²(配合強度58N/mm²、変動係数8%)を満足する混和材コンクリート(以降、早強型混和材コンクリートと称す)の検討を行ってきた。その結果、練混ぜから90分後でも十分な施工性を有する場所打ち用の早強型混和材コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった⁴⁾。ただし、練上り直後から打込み終了までのコンクリートのスランプフローおよび空気量(以降、フレッシュ性状と称す)の経時変化や初期の強度発現性は環境温度の影響を受ける可能性がある。

そこで、本稿では早強型混和材コンクリートの実用化に向け、環境温度の変化がフレッシュ性状およびその経時変化や初期強度発現性に与える影響を確認するため、環境温度を10℃および30℃として各種試験を実施し、それらの結果と環境温度20℃を含めた総合的な検討結果について報告する。



椎野碧



中瀬博一

2. 実験概要

2.1 要求性能

早強型混和材コンクリートの要求性能を表-1に示す。配合強度は変動係数8%を考慮した58N/mm²(材齢3日)、場所打ちとなる間詰め部のポンプ圧送による打ち込みを想定しており、練上りから90分後のスランプフローおよび空気量の目標値は60±10cmおよび4.5±1.5%とした。また、膨張率は200±50μとした。

2.2 使用材料

使用材料を表-2に示す。早強材ACはエトリンナイトおよびカルシウムシリケート水和物の生成を作用機構とするものであり、膨張材EXはCSAを主成分としたものである。また、EXはメーカーヒアリングより、強度発現への寄与が小さく細骨材の一部と置換することが標準とされているため、本検討でも細骨材の一部と置換して使用した。

2.3 配合

早強型混和材コンクリートの配合を表-3に示す。水結合材比W/Bは、BFSを用いた早強型混和材コンクリート(以降、早強型BFSと称す)およびFAを用いた早強型混和材コンクリート(以降、早強型FAと称す)でともに31.0%とし、単位水量および粗骨材絶対容積は170kg/m³および373L/m³(単位粗骨材量985kg/m³)とした。

2.4 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ方法を図-1に示す。コンクリートの練混ぜはモルタル先練り方式とし、モルタル練りを150秒、コンクリート練りを90秒実施した。練混ぜには公称容量55Lの強制練り水平二軸ミキサを使用し、1バッチあたりの練混ぜ量は30~45リットルとした。

2.5 試験項目、試験方法および養生方法

試験項目および試験方法を表-4に示す。各試験は当該JISに準拠して実施した。なお、環境温度10℃および30℃における拘束膨張試験では温度の影響をコンクリートのみでなく、拘束治具も受ける恐れがあったため、材齢1日の測定は実施しなかった。

養生方法を表-5に示す。環境温度の変化によるフレッシュ性状の変化および初期の強度発現性を確認す

表-1 要求性能

試験項目	目標値
設計基準強度	50N/mm ²
設計基準強度に対する配合強度	58N/mm ²
スランプフロー(練上りから90分後)	60±10cm
空気量(練上りから90分後)	4.5±1.5%
膨張率(材齢7日)	200±50μ

表-2 使用材料

材 料	記号	仕 様
水	W	上水道水
セメント	C	早強ポルトランドセメント, 密度3.14g/cm ³
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末6000, 密度2.91g/cm ³
	FA	フライアッシュII種, 密度2.36g/cm ³
膨張材	EX	主成分はCSA, 粉体密度2.95g/cm ³
早強材	AC	エトリンナイトおよびカルシウムシリケート水和物の生成を作用機構とする, 粉体, 密度2.91g/cm ³
細骨材	S1	陸砂(茨城県行方市産), 表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率2.58%, F.M.2.59
	S2	砕砂(茨城県鹿沼市産), 表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.14%, F.M.2.98
粗骨材	G	碎石(茨城県鹿沼市産), 表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.64%, 最大寸法20mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤,標準形
	AE	AE剤
	R	流動保持剤(液体)

表-3 配合

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								添加率(B×%)				
			W	B			EX	AC	S		G	SP	AE	R	
				C	FA	BFS			S1	S2					
早強型BFS	31.0	35.8	170	274	—	274	25	40	269	273	985	表-6参照			
早強型FA	31.0	35.6	170	466	82	—	23	40	268	272	985				



図-1 練混ぜ方法

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	実施時期
圧縮強度	JIS A 1108	材齢1, 2, 3, (4), 7日
スランプフロー	JIS A 1150	練上り直後, 15分, 30分, 60分, 90分, (環境温度10℃では120分)
空気量	JIS A 1128	同上
コンクリート温度	JIS A 1156	同上
拘束膨張(A法)	JIS A 6202	材齢(1), 3, 7日

表-5 養生方法

試験項目	環境温度(℃)	養生方法
圧縮強度	10	打設(10℃)→封かん養生(10℃)
	20	打設(20℃)→封かん養生(20℃)
	30	打設(30℃)→封かん養生(30℃)
拘束膨張	10	打設, 脱枠(10℃)→標準養生
	20	打設, 脱枠(20℃)→標準養生
	30	打設, 脱枠(30℃)→標準養生

るため、環境温度を10℃および30℃の2水準とし、圧縮強度供試体は封かん養生、拘束膨張供試体は標準養生とした。なお、封かん養生供試体は各環境温度に設定した養生槽内で試験材齢まで静置した。

3. 実験結果

環境温度をパラメータとして実施した各種試験結果を下に示す。

3.1 フレッシュ性状

各環境温度における、練上り直後のスランブフローおよび空気量の試験結果を表-6に示す。

環境温度 20℃では、練上り直後のスランブフローを 50cm 程度、空気量を 9.0%以上とすることで、練上りから 90 分後におけるスランブフローおよび空気量の目標値を満足することが確認されていたため⁴⁾、環境温度 10℃および 30℃でも練上り直後のフレッシュコンクリートの性状が 20℃と同程度となるよう混和剤の添加量を調整

した。その結果、混和剤の添加量を調整することで、材料分離などは発生せず目標とするスランブフローおよび空気量が得られた。高性能 AE 減水剤の添加量は 20℃と比較して、10℃および 30℃でともに増加する傾向にあった。また、AE 剤の添加量は 10℃では減少し、30℃では増加する結果となった。

3.2 経時変化

3.2.1 スランブフロー

各環境温度における、練上りからの経過時間とスランブフローの関係を図-2に示す。

(1) 早強型 BFS

環境温度が 10℃の場合、流動保持剤の添加量を環境温度 20℃と同様の結合材に対して 1.0%とした場合、練上りから 30 分後にかけてスランブフローが大幅に増大し、材料分離が発生した。そのため、流動保持剤を無添加とした結果、添加量 1.0%と同様に練混ぜから 15 分後までスランブフローが増大したものの、材料分離は生じず、練上りから 90 分後でもスランブフローの目標値を満足した。さらに、それ以降の練上りから 120 分後においてもスランブフローの目標値を下回らなかった。

環境温度が 30℃の場合では、流動保持剤の添加量が環境温度 20℃と同様の 1.0%では練上りから 60 分以降目標値を下回ったため、経時変化の測定を中断した。そこで、流動保持剤の添加量を 1.5%とした結果、練上りから 90 分後でもスランブフローの目標値を満足した。

表-6 フレッシュコンクリートの性状

混和材	環境温度 (℃)	添加率(B×%)			スランブフロー (cm)	Air (%)	コンクリート温度 (℃)
		SP	AE	R			
BFS	10	2.00	0.150	1.0	37.0	10%以上	13
		1.70	0.080	—	50.0	7.0	14
	20	1.50	0.150	1.0	56.0	9.9	22
		1.80	0.150	1.0	45.0	7.6	32
		2.00	0.170	1.5	49.0	8.3	33
		2.60	0.060	—	52.5	9.5	13
30	2.50	0.085	1.0	50.5	7.0	20	
	3.45	0.250	1.5	48.0	9.0	33	
	3.85	0.280	2.0	50.0	9.0	33	
	—	—	—	—	—	—	

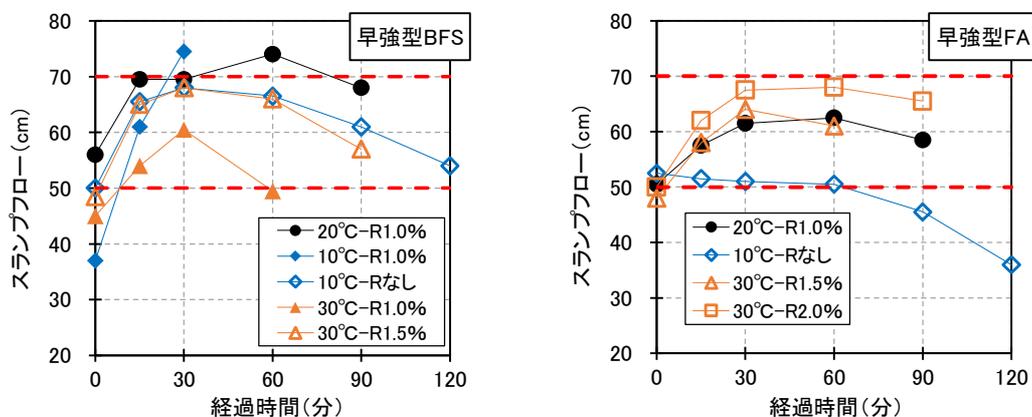


図-2 経過時間とスランブフローの関係

(2) 早強型 FA

環境温度が 10℃の場合、流動保持剤が無添加では練上りから 60 分後までスランプフローの目標値を満足していたが、練上りから 90 分後で目標値を下回った。ただし、練上り直後から 120 分後のスランプフローの低下量は 15cm 程度であり、練上り直後のスランプフローを 60cm 程度とする、もしくは流動保持剤の添加量を調整することで、練上りから 120 分後でも目標値を満足することが可能であると考えられる。一方、環境温度が 30℃の場合では、流動保持剤の添加量が早強型 BFS と同様の 1.5%では練上りから 60 分以降でスランプフローが大幅に低下し、90 分後のスランプフロー試験が困難と判断されたため、経時変化の測定を中断した。そこで、流動保持剤の添加量を 2.0%とした結果、練上りから 90 分後でもスランプフローの目標値を満足した。

3.2.2 空気量

各環境温度における、練上りからの経過時間と空気量の関係を図-3 に示す。

(1) 早強型 BFS

練上りから 90 分後までの空気量の低下量は、環境温度 20℃では 5.5%、10℃では 3.0%、30℃では 5.3%となり、環境温度 20℃と比較し、空気量の低下量は環境温度が 10℃では小さく、30℃では同程度となった。

(2) 早強型 FA

練上りから 90 分後までの空気量の低下量は、環境温度 20℃では 4.2%、10℃では 4.7%、30℃では 5.7%となり、環境温度 20℃と比較し、空気量の低下量は環境温度が 10℃では同程度、30℃では大きくなった。

このことから、高温環境下での適用に際しては、アジテータ車で運搬した場合の空気量の経時変化の傾向などを事前に調査しておく必要があると考えられる。なお、後述の圧縮強度供試体および拘束膨張供試体には表-6 のハッチング部に示すコンクリートを用い、採取はフレッシュ性状の経時変化確認後に実施した。

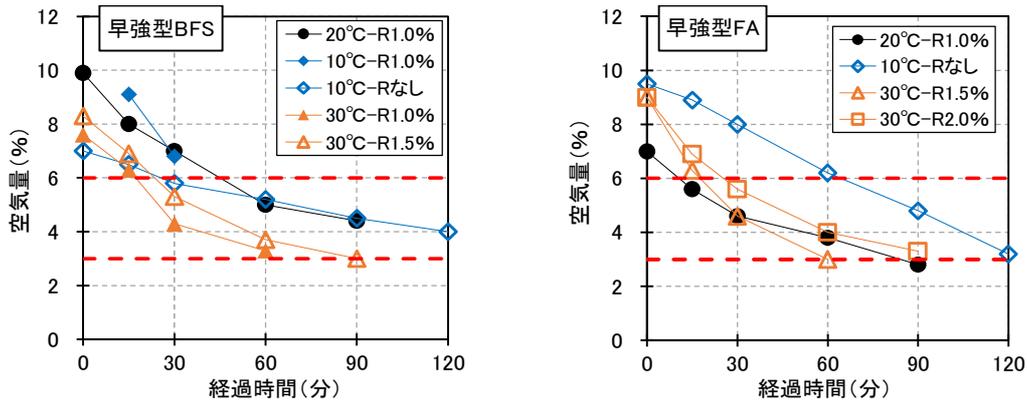


図-3 経過時間と空気量の関係

3.3 圧縮強度

3.3.1 強度発現性

環境温度をパラメータとして実施した、早強型 BFS および早強型 FA の材齢と圧縮強度の関係をそれぞれ図-4 に、配合強度を満足する材齢を表-7 に示す。

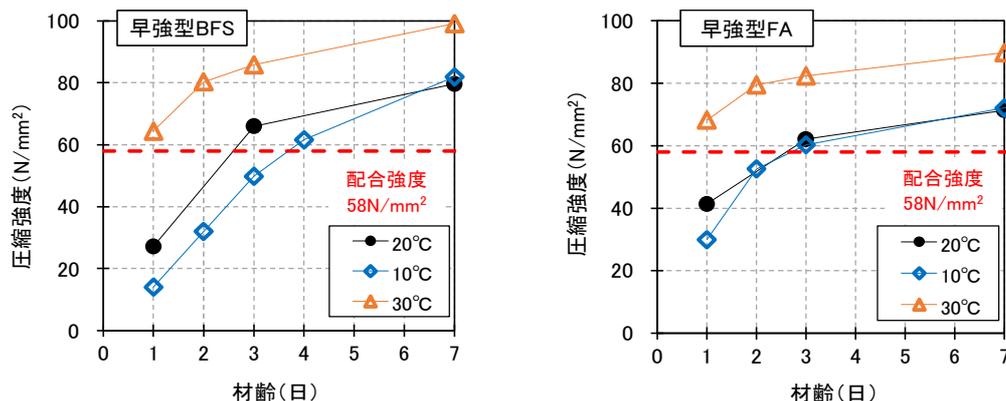


図-4 材齢と圧縮強度の関係

(1) 早強型 BFS

配合強度を満足する材齢は環境温度が10℃の場合、材齢4日となり、環境温度20℃に比べて遅延したが、その差は僅かであり、場所打ちコンクリートとして適用が可能であると考えられる。

また、材齢7日の圧縮強度は環境温度20℃と同程度となった。一方、環境温度30℃の場合、初期の強度発現性が大きく向上し、早強型 BFS および早強型 FA とともに材齢1日で配合強度を満足した。また、材齢1日から材齢7日までの圧縮強度発現は、環境温度20℃と同程度であった。

(2) 早強型 FA

環境温度が10℃の場合、環境温度20℃と同様に材齢3日で配合強度を満足し、材齢7日では環境温度20℃と同程度の圧縮強度となった。30℃の場合、早強型 BFS と同様に初期の強度発現性が大きく向上し、材齢1日で配合強度を満足した。

以上より、早強型混和材コンクリートの初期の強度発現性は、環境温度20℃と比較し、環境温度10℃では若干低下する傾向にあり、環境温度30℃では大きく向上する傾向にあることが確認された。

表-7 各環境温度で配合強度を満足する材齢

配合	環境温度		
	10℃	20℃	30℃
早強型 BFS	4日	3日	1日
早強型 FA	3日	3日	1日

3.3.2 積算温度と圧縮強度の関係

早強型混和材コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係を図-5に示す。なお、赤色の近似曲線は環境温度30℃を含む全ての環境温度より導かれたものであり、緑色の近似曲線は環境温度30℃を除いたものである。積算温度 M は「2017年制定 コンクリート標準示方書 [施工編：施工基準]」に示されている式-1により算出した。

対数近似により得られた推定式より算出した圧縮強度の推定値と実測値の関係を図-6および図-7にそれぞれ示す。前項で記述したとおり、高温環境下では初期の強度発現性が大幅に向上することから、図-6に示すように環境温度10℃、20℃、30℃全ての積算温度から圧縮強度を推定した場合、初期材齢でのバラツキが大きくなった。一方、図-7に示すように30℃を除くことでバラツキが小さくなった。

以上より、環境温度10℃および20℃の積算温度と圧縮強度の関係から早強型混和材コンクリートの強度発現を精度よく推定することが可能であり、施工計画を立てる上で有効と考えられる。また、環境温度30℃の場合は10℃および20℃の近似式を用いて圧縮強度を推定することにより安全側に評価が可能であると考えられる。

$$M = \sum(\theta + A) \Delta t \quad \text{式-1}$$

ここに、 M ：積算温度(℃・時)

θ ： Δt 時間中のコンクリート温度(℃)

A ：定数(10℃)

Δt ：時間(時)

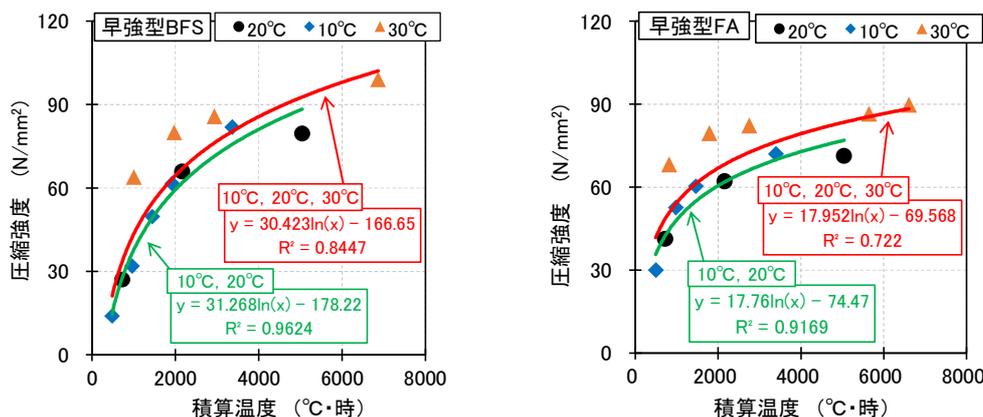


図-5 積算温度と圧縮強度の関係

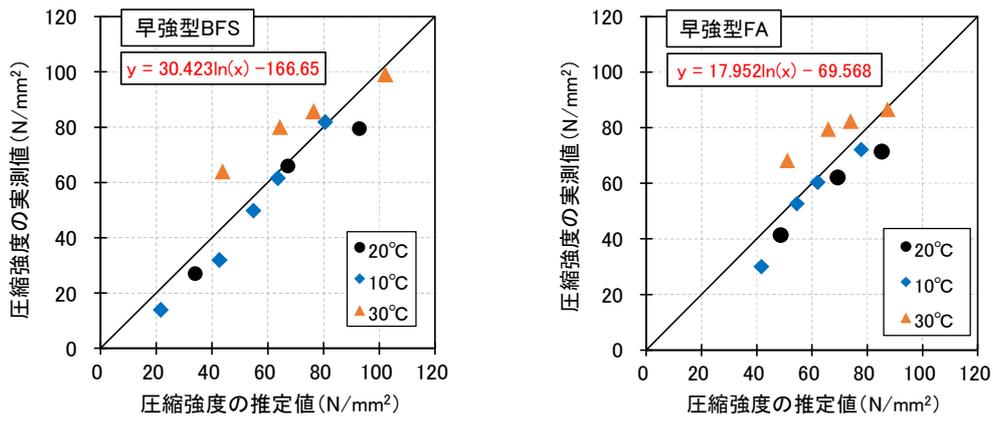


図-6 推定値と実測値の関係(30°C含む)

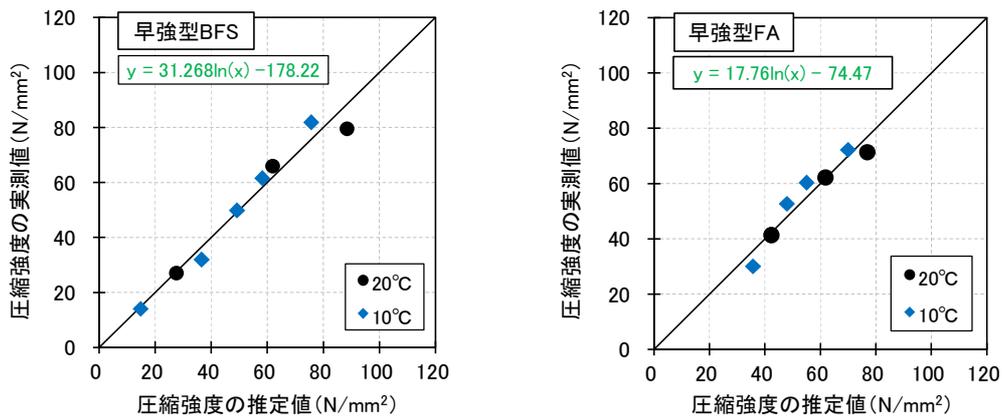


図-7 推定値と実測値の関係(30°C除く)

3.4 膨張率

材齢と膨張率の関係を図-8に示す。早強型 BFS および早強型 FA いずれにおいても環境温度 10°Cおよび 30°Cでは環境温度が 20°Cの場合と比較し、材齢 7 日の膨張率は減少する傾向であった。環境温度 10°Cでは膨張反応が遅延し、30°Cではコンクリートの硬化および強度発現が早く、膨張反応による自由膨張が制約されたことなどが一因と推察されるが、本研究の範囲では明確な原因は不明であった。

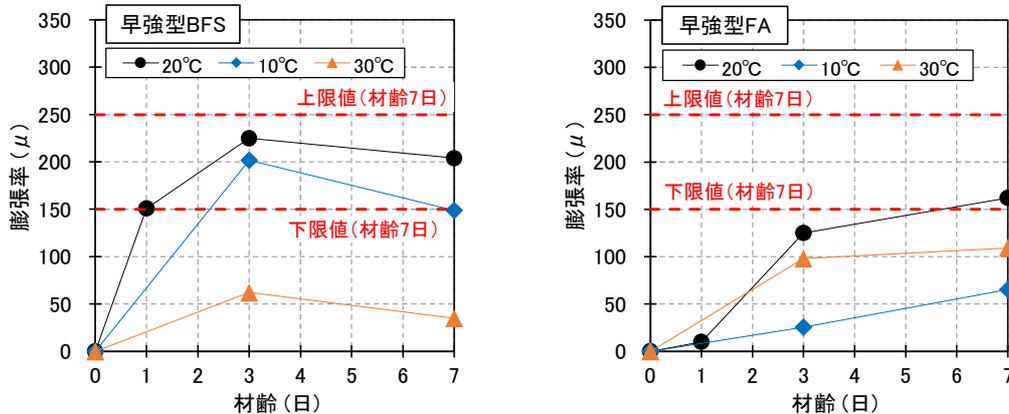


図-8 材齢と膨張率の関係

4. まとめ

20℃の環境温度下において、十分なスランプフロー保持性能および初期の強度発現性を有する場所打ち用の早強型混和材コンクリートについて、環境温度の変化がスランプフローおよび空気量の経時変化および初期の強度発現性に与える影響を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 早強型 BFS および早強型 FA とも環境温度 20℃の場合と同等のフレッシュ性状を得るには、30℃の高温環境下では高性能 AE 減水剤および AE 剤は増加、10℃の低温環境下では高性能 AE 減水剤は増加、AE 剤は減少させる必要があった。
- (2) 本検討で実施したすべての環境温度において、混和剤の添加量を調整することでフレッシュ性状の目標値を満足した。
- (3) 早強型 BFS および早強型 FA いずれの配合も、環境温度 20℃の場合と比べ、30℃の高温環境下ではスランプフローおよび空気量の経時変化が大きく、10℃の低温環境下では小さくなった。
- (4) 早強型混和材コンクリートの初期の強度発現性は、環境温度 20℃と比較し、環境温度 10℃では若干低下する傾向であり、環境温度 30℃では大きく向上する傾向であった。ただし、低温環境下における初期強度発現の遅延は僅かであるため、場所打ちコンクリートとして 10℃～30℃の温度環境下で適用が可能であることが明らかとなった。
- (5) 積算温度と圧縮強度の関係は環境温度 10℃と 20℃は 1 つの推定式で示せた。
- (6) 材齢 7 日における膨張率は環境温度 20℃と比較すると 10℃および 30℃では減少する傾向にあった。

参考文献

- 1) 鳥居和之：フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化—北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信—，電力土木，No.357，pp11-15，2012
- 2) 松村将充，蓑田理希ほか：高炉スラグ微粉末を含有したプレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp803-808，2006
- 3) i-Construction～建設現場の生産性革命～参考資料，2016.4
- 4) 椎野碧，中瀬博一ほか：混和材を用いた場所打ちコンクリートの早強化の検討，第 29 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，pp435-440，2020