

混和材を用いたコンクリートの強度発現と自己収縮特性への温度履歴の影響

(独) 土木研究所 正会員 工修 ○石井 豪

(独) 土木研究所 正会員 工修 中村 英佑

(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 工博 鈴木 雅博

(独) 土木研究所 正会員 工博 渡辺 博志

Abstract : An experimental investigation was conducted to study effects of temperature history on the strength development and autogenous shrinkage of concrete made with supplementary cementitious materials. The experimental results showed that the temperature history significantly affected the strength development and autogenous shrinkage. Although the strength development was well expressed by using the maturity method, the reduction in the long-term strength was found in concrete specimens that were cured at high temperature. Additionally, substantial increase in the autogenous shrinkage was observed in concrete specimens that were made with GGBF slag and cured in semi-adiabatic formworks.

Key words : Supplementary cementitious materials , Strength development , Autogenous shrinkage , Temperature

1. はじめに

近年、環境負荷低減や耐久性向上を目的として、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コンクリートの適用に向けての検討が活発に行われている¹⁾。プレストレストコンクリート構造物においても、セメント製造に由来するCO₂排出量の削減や、塩化物イオン浸透ならびにアルカリ骨材反応の抑制による耐久性向上を目的として、主に早強ポルトランドセメントとの組合せでの採用実績が増えつつある。プレストレストコンクリート構造物に混和材を用いたコンクリートを適用するにあたり、プレストレスト導入時期の設定やひび割れ抵抗性の評価を適切に行うために、コンクリートの温度履歴が強度発現や収縮特性に与える影響を把握することが求められる。しかしながら、普通ポルトランドセメントと混和材の組合せに関する知見は多いが^{2)~5)}、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の温度履歴が強度発現や収縮特性に及ぼす影響を検討した事例⁶⁾はあるものの、設計用値を定めるほどの知見は蓄積されていない。そこで、早強ポルトランドセメントの一部をフライアッシュまたは高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートを対象とし、打込み後の温度履歴が強度発現と自己収縮特性に与える影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 配合と使用材料、練上がり温度

コンクリートの配合と使用材料を表-1に示す。混和材を用いた配合では、早強ポルトランドセメント(HPC)をベースとして、内割でフライアッシュII種(FA)が20%(H35F20)、高炉スラグ微粉末4000(SG4)が30%(H35B430)、高炉スラグ微粉末6000(SG6)が50%(H35B650)となるように各混和材を置換した。水結合材比(W/B)は、材齢3日の圧縮強度を概ね同等とするため、HPC単味の配合(H40)で40%とし、H35F20、H35B430、H35B650で35%とした。化学混和剤として高性能AE減水剤を使用し、スランプ12±2.5cmと空気量4.5±1.5%を目標値として使用量を調整した。また、各混和材の使用が強度発現と自己収縮特性に与える影響を把握するために、全配合で単位水量と単位粗骨材量を同一とした。

試験に用いたコンクリートは、練上がり温度が寒中を想定した10℃、標準期を想定した20℃、暑中を想定した30℃となるようにあらかじめ材料の温度を調整し、それぞれ同等の室温の実験室内で採取した。

表-1 配合と使用材料

配合名	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)							
			W	HPC	FA	SG4	SG6	S	G	
H40	40%	45.0%	165	413					758	968
H35F20	35%	42.4%		377	94				682	
H35B430		43.0%		330		141		700		
H35B650		42.9%		236			236	695		
使用材料			記号	諸物性						
早強ポルトランドセメント			HPC	密度=3.14g/cm ³ , 比表面積=4,580cm ² /g						
フライアッシュ II種			FA	密度=2.08g/cm ³ , 比表面積=3,810cm ² /g						
高炉スラグ微粉末 4000			SG4	密度=2.89g/cm ³ , 比表面積=4,410cm ² /g						
高炉スラグ微粉末 6000			SG6	密度=2.91g/cm ³ , 比表面積=6,170cm ² /g						
細骨材			S	静岡県掛川産陸砂: 表乾密度=2.56g/cm ³ , 吸水率=2.23%						
粗骨材			G	茨城県笠間産砕石5号: 表乾密度=2.67g/cm ³ , 吸水率=0.43% および同砕石6号: 表乾密度=2.67g/cm ³ , 吸水率=0.46% を均等に混合						
高性能AE減水剤			—	ポリカルボン酸エーテル系 (練上がり10℃, 20℃)						
高性能AE減水剤 (遅延形)			—	ポリカルボン酸エーテル系 (練上がり30℃)						

表-2 養生方法と試験材齢

養生方法	練上がり10℃	練上がり20℃	練上がり30℃
封かん養生 (練上がり温度と同一の 室温の恒温室内で保管)	3,7,14,28, 56,91,140日	3,7,14,28, 56,91,140日	3,7,14,28, 56,91,140日
簡易断熱養生	3,7,28,91日	3,7,28,91日	3,7,28,91日
標準養生 (20℃水中)	—	28,91日	—

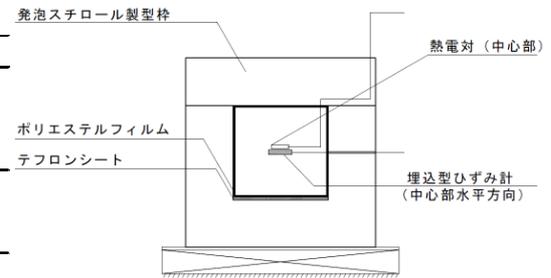


図-1 マスブロック

2.2 圧縮強度

圧縮強度の測定に用いた円柱供試体 (φ100×200mm) の養生方法および試験材齢を表-2に示す。養生方法は、封かん養生、簡易断熱養生および標準養生の3種類とした。封かん養生は、練上がり温度の目標値と同一の室温に管理した恒温室内で行った。簡易断熱養生は、マスコンクリートで水和発熱によりコンクリートの温度が上昇することを模擬するため、JASS 5 T-606に準拠して行った。標準養生は、練上がり温度20℃のみで実施した。

2.3 自己収縮ひずみ

打込み後の温度履歴が混和材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみに与える影響を把握することを目的として、簡易的に断熱状態としたマスブロック (400×400×400mm) の自己収縮ひずみとコンクリート温度を測定した (図-1)。測定はマスブロックの中心に水平配置した埋込型ひずみ計と熱電対で行った。断熱には発泡倍率90倍、厚さ200mmの発泡スチロール製型枠を使用し、温度の管理のされていない実験室でコンクリート打込み直後から封かん状態とした。また、比較用に、「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法⁷⁾」に準拠した供試体 (100×100×400mm, 以下、小型供試体と略す) を用いて、室温20℃の実験室内で、自己収縮ひずみとコンクリート温度を測定した。測定には、埋込型ひずみ計と熱電対を用いた。マスブロックおよび小型供試体の数量は、各条件でそれぞれ1体ずつとした。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状と凝結時間

フレッシュ性状と凝結時間の試験結果を表-3に示す。いずれの配合においても、練上がり温度が高いほど、凝結時間が早くなった。また、10, 20, 30℃の全ての温度条件において、凝結時間の早い順に H35B650, H40 および H35B430, H35F20 であった。

表-3 フレッシュ性状と凝結時間

配合	フレッシュ性状									凝結時間					
	10℃			20℃			30℃			10℃		20℃		30℃	
	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上がり 温度 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上がり 温度 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上がり 温度 (℃)	始発 (日)	終結 (日)	始発 (日)	終結 (日)	始発 (日)	終結 (日)
H40	11.0	4.4	11.7	15.5	5.7	20.1	14.5	5.7	31.6	0.35	0.52	0.25	0.33	0.21	0.25
H35F20	8.8	5.0	12.5	14.0	3.8	20.8	11.0	2.8	32.5	0.40	0.56	0.27	0.38	0.21	0.26
H35B430	9.5	4.2	12.6	12.0	4.5	21.0	13.0	5.1	32.7	0.38	0.52	0.25	0.33	0.21	0.25
H35B650	13.5	3.7	12.8	12.0	4.0	21.0	12.5	3.0	32.5	0.31	0.48	0.21	0.29	0.15	0.21

3.2 コンクリート温度

今回の実験では、材齢 3 日の圧縮強度を概ね同等とするために混和材を用いた配合で W/B を 5% 低減したため、配合の違いにかかわらず、コンクリートの温度履歴がほぼ同等であった。このため、ここでは代表例として H40 のコンクリート温度を図-2 に示す。マスブロックは練上がりから 60℃ 程度上昇し最高温度となった。また、簡易断熱を行った円柱供試体の最高温度はマスブロックより 10~15℃ 程度低くなった。温度一定の恒温室に保管した円柱供試体の温度は、練上がり温度から 5℃ 程度上昇し、その後は恒温室の室温と同程度で推移した。いずれの供

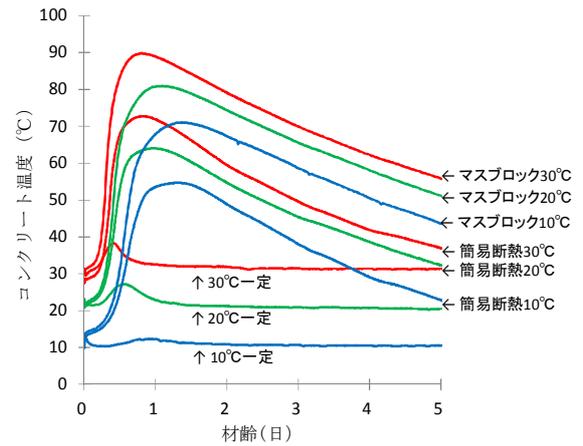


図-2 温度履歴 (H40)

試体においても、練上がり温度が高いほど温度勾配の立ち上がりが大きく、最高温度に達するまでの時間が短くなった。このようにコンクリートの温度履歴は、供試体の寸法や練上がり温度、打込み後の養生方法の違いにより大きく異なった。

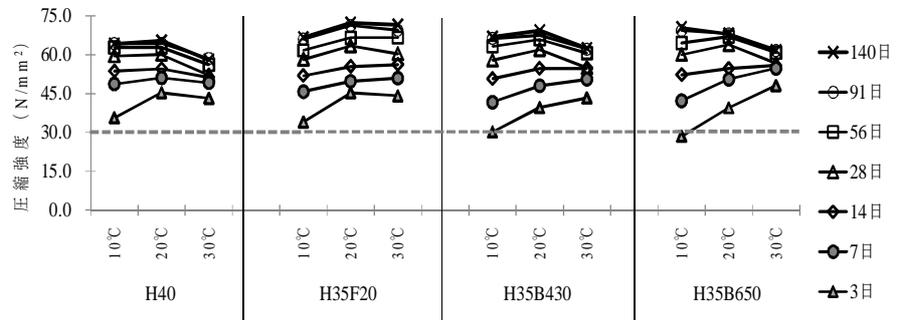


図-3 封かん養生を行った供試体の圧縮強度の推移

3.3 圧縮強度

(1) 材齢と圧縮強度の関係

封かん養生を行った供試体の圧縮強度の推移を図-3 に示す。練上がり温度が 20℃ および 30℃ の場合は、全ての配合で、材齢 3 日の圧縮強度は 30N/mm² 以上であった。しかし、練上がり温度が 10℃ の場合では、混和材を使用した配合の強度発現が遅れる傾向にあった。

H35B650 では、前述したように凝結時間は最も早くなったが、特に低温時に強度発現が最も遅れた。また、H40, H35B430, H35B650 では、

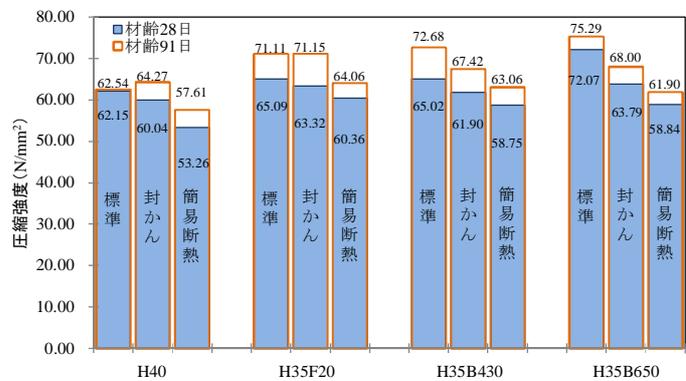


図-4 材齢 28, 91 日の圧縮強度

練上がり温度が高いほど初期強度の発現は大きくなったが、長期強度の伸びが小さく、練上がり温度の低い供試体の圧縮強度が練上がり温度の高い供試体の圧縮強度を上回った。一方、H35F20 では長期材齢におい

でも練上がり温度が高いほど圧縮強度が大きくなった。フライアッシュの反応が遅く⁸⁾、強度発現が長期的に継続したためではないかと考えられる。

次に、練上がり温度を 20℃として、標準養生、封かん養生、簡易断熱養生を行った供試体の材齢 28, 91 日の圧縮強度を図-4 に示す。標準養生と封かん養生を比較したところ、H40, H35F20 の圧縮強度は養生方法にかかわらずほぼ同等であるのに対し、H35B430, H35B650 では標準養生の圧縮強度が高かった。高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 および H35B650 の強度発現は水分の供給状態に大きく影響を受けると考えられる。一方、外部からの水分の供給が無い封かん養生と簡易断熱養生を比較すると、全ての配合において、高温履歴を受けた簡易断熱養生の圧縮強度は封かん養生の圧縮強度より小さくなった。高温履歴を受けた場合には混和材の使用の有無にかかわらず、コンクリートの細孔組織が粗になり圧縮強度が低下したためではないかと考えられる。ただし、混和材を使用した配合では、H40 よりも封かん養生と簡易断熱養生の強度差が小さく、特に H35F20 で強度差が小さくなった。

(2) 有効材齢と圧縮強度の関係

簡易断熱養生を行った供試体と封かん養生を行った供試体の圧縮強度を有効材齢で整理した結果を図-5 に示す。ここで有効材齢は、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008⁹⁾」に示されている式(1)を用いて算出した。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (1)$$

t_e : 有効材齢, Δt_i : ある一定のコンクリート温度が継続する期間,

$T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度, T_0 : 1℃

また、参考として、上記指針⁹⁾に示されている式(2)を用いて算出した有効材齢と強度の関係を図-5 に併記した。なお、式(2)の係数 a, b は練上がり温度 20℃の封かん養生を行った供試体の圧縮強度から最小二乗法により求めた。

$$f_c'(t_e) = \frac{t_e - s_f}{a + b \cdot (t_e - s_f)} f_c'(t_n) \quad (2)$$

$f_c'(t_e)$: 材齢 t_e での圧縮強度, $f_c'(t_n)$: 材齢 n での強度 (ここでは標準養生 28 日強度実測値), t_e : 有効材齢, s_f : 硬化原点の有効材齢(日) (ここでは凝結始発時の有効材齢実測値), a および b : 係数

図-5 によると、有効材齢 10 日程度までの圧縮強度と有効材齢の関係は、練上がり温度の違いによるばらつきが小さくなったことが分かる。このため、有効材齢を用いることにより、プレストレス導入時期等の比較的初期の材齢の強度発現を配合ごとに単一の曲線から推定することが可能であると思われる。一方、有効材齢 10 日以降では、封かん養生 30℃と簡易断熱養生

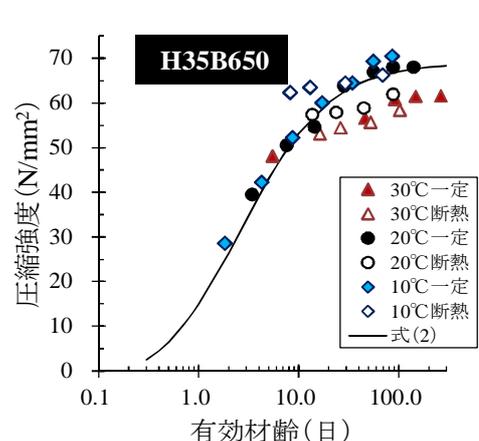
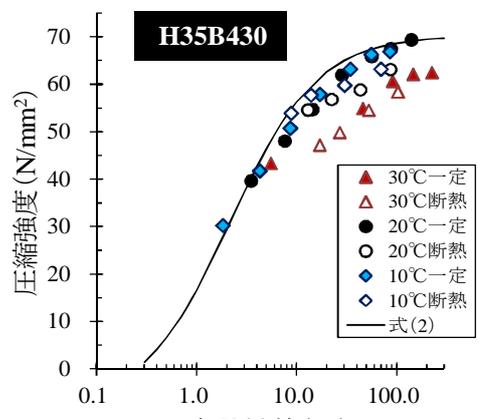
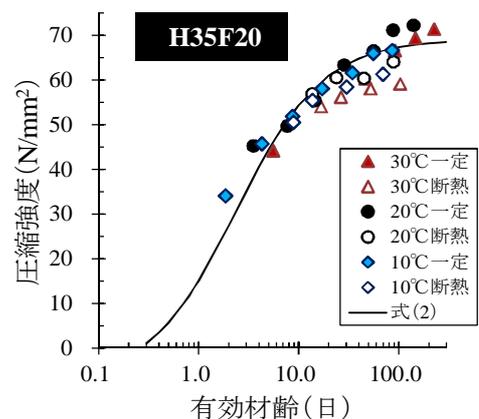
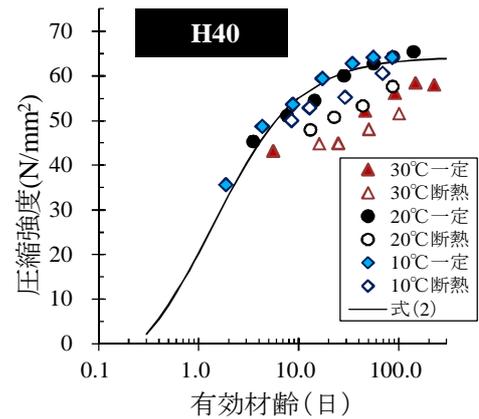


図-5 有効材齢と圧縮強度

では強度発現が小さくなったが、封かん養生 10℃ および 20℃では強度発現が継続したため、養生時の温度履歴の違いによる圧縮強度の差が大きくなった。ただし、H35F20 では養生時の温度履歴の違いによる圧縮強度の差が他の配合よりも小さかった。フライアッシュの反応が温度履歴を受けた場合でも遅く⁸⁾、強度発現が長期的に継続したことなどが原因ではないかと推察される。

3.4 自己収縮ひずみ

練上がり温度を 10, 20, 30℃としたマスブロック供試体と練上がり温度を 20℃として 20℃の室内に保管した小型供試体の自己収縮ひずみを図-6 に示す。横軸は原点を始発時間とした有効材齢で示した。なお、温度ひずみは、材齢 56 日以降に小型供試体を用いて測定した線膨張係数を用いて補正した。

配合別に小型供試体とマスブロックを比較すると、全ての配合で、小型供試体よりもマスブロックにおいて、自己収縮ひずみの増加開始時期が早く、増加速度も大きくなった。また、有効材齢 5 日時点の収縮量は、小型供試体よりもマスブロックで大きくなった。横軸を有効材齢として整理しても、自己収縮ひずみの増加開始時期やその後の増加速度などの挙動は、コンクリートの温度履歴によって大幅に異なった。また、マスブロックの自己収縮ひずみを練上がり温度の違いに着目して比較すると、自己収縮ひずみの増加開始時期は全ての配合で練上がり温度 30℃が最も早くなったが、収縮量は H35F20 以外の配合では 30℃が最も小さくなった。

配合間で自己収縮ひずみの増加開始時期の比較を行うと、練上がり温度 30℃の場合は全配合でほぼ同時期であったが、20℃と 10℃では H40 が最も早く、混和材を使用したものが若干遅くなる傾向にあった。また、収縮量は、試験方法の違いや温度の違いに関わらず、H40 よりも高炉スラグ微粉末を使用した場合に大きくなり、フライアッシュを使用した場合には小さくなった。こうした配合間の収縮量の大小関係の差は小型供試体でも同様の傾向が確認できるため、収縮量の傾向は小型供試体の試験結果からでも把握できると考えられる。

次に、有効材齢 28 日時点の自己収縮ひずみとコンクリートの最高温度 (T_{max}) の関係を図-7 に示す。小型供試体とマスブロックの自己収縮ひずみは有効

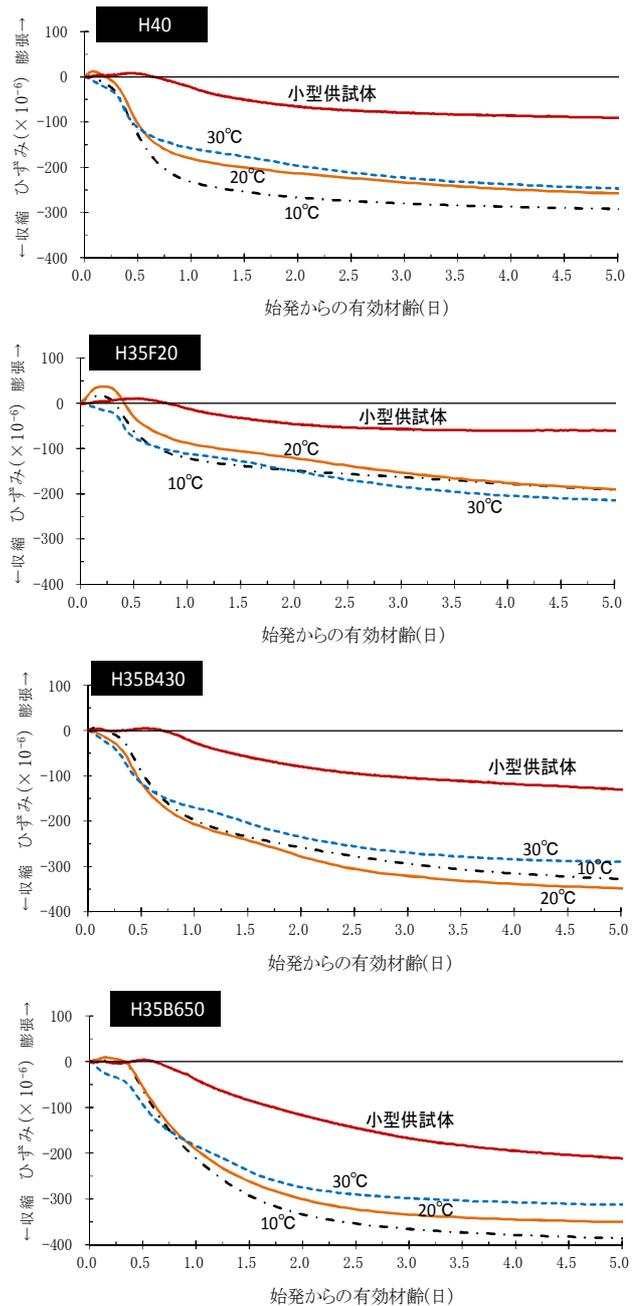


図-6 自己収縮ひずみの測定結果

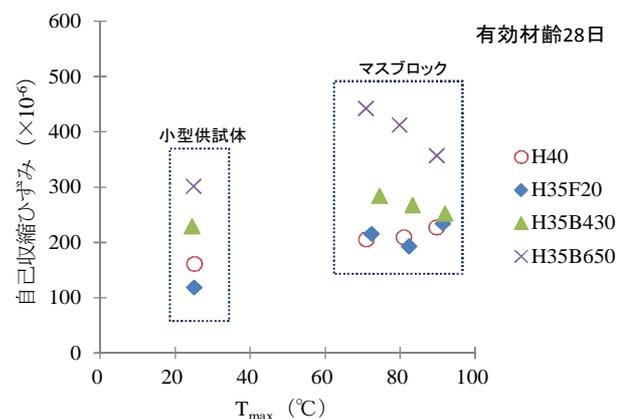


図-7 自己収縮ひずみと最高温度

材齢 28 日時点でも差が生じており、高温履歴を受けたマスブロックの自己収縮ひずみが小型供試体よりも大きくなる傾向にあった。ただし、有効材齢 28 日の時点では、70℃以上の高温履歴を受けた場合には、H35B4530、H35B650 の自己収縮ひずみは最高温度が高いほど減少する傾向にあったのに対し、H40、H35F20 では最高温度にかかわらず概ね同程度の自己収縮ひずみとなった。

4. まとめ

本論文の範囲内で得られた結果を下記に示す。

- (1) 混和材の使用の有無にかかわらず、一般的に脱型やプレストレスの導入を行う比較的初期の材齢の強度発現は有効材齢を用いた単一の曲線で推定できることが分かった。また、高温履歴を受けた場合には長期的な強度発現が小さくなる傾向にあり、有効材齢を用いた単一の曲線から圧縮強度が乖離する場合があった。
- (2) 混和材の使用の有無にかかわらず、簡易断熱養生を行って高温履歴を与えた供試体の自己収縮ひずみは、高温履歴を与えなかった供試体よりも増加開始時期が早く、増加速度は大きくなった。また、温度履歴が大幅に異なる場合の自己収縮ひずみは有効材齢で整理しても傾向が異なることが分かった。
- (3) 自己収縮ひずみの増加開始時期や増加速度は使用する混和材の種類によっても異なり、収縮量は早強ポルトランドセメント単味の配合と比較すると、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートで大きく、フライアッシュを使用したコンクリートで小さくなった。

なお、本研究は、(独)土木研究所、(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会ほか国内 7 機関による共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 例えば、日本コンクリート工学会：混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会報告書，p.184，2013.
- 2) 森本文太郎，魚本健人：初期高温養生したポルトランドセメントの細孔構造に関する研究，コンクリート工学論文集，第7巻第1号，1996.
- 3) 伊代田岳史，兼安真司，檀康弘，前田悦孝：高炉スラグ微粉末を高含有したセメントの温度依存特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，2005.
- 4) 宮澤伸吾，佐藤良一，杉山淳司：高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，2008.
- 5) 丁海文，河野広隆，渡辺博志，鈴木雅博：水和熱による高温履歴が高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，1999.
- 6) 日本コンクリート工学会：混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会報告書，pp.145-155，2013.
- 7) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，pp.209-210，1994.
- 8) 例えば，小田部裕一，岸利治：セメント-高炉スラグ-フライアッシュ混合セメントの水和反応，土木学会第59回年次学術講演会，5-564，pp.1125-1126，2004.
- 9) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，pp.47-52，2008.