

論文 プレキャストコンクリートの初期強度発現に関する研究

丸山 貴吉^{*1}・中嶋 望^{*2}・橋本 紳一郎^{*3}・伊達 重之^{*4}

要旨: コンクリート製品は生産性向上として蒸気養生が多くの工場で行われている。しかし、初期強度発現に及ぼす蒸気養生の影響に関する詳しい検討例は少ない。本研究では、脱型時の品質確保の観点から強度発現性が重要である1日2回転での製造工程に着目し、蒸気養生条件や配合条件がコンクリートの初期強度の発現性状に及ぼす影響について、既に提案されている各種有効材齢式が適用可能であるか比較検討を行った。その結果、Maturity 則に比べて Arrhenius 則ならびに Saetta らの活性化エネルギーの経験則を用いることの方が、コンクリートの初期強度発現に及ぼす蒸気養生の影響をより適切に評価できることが分かった。

キーワード: プレキャストコンクリート, 蒸気養生, 圧縮強度, 有効材齢, 積算温度

1. はじめに

プレキャストコンクリート製品は、一般に良好な管理の下で製造されているが、時として製造段階においてひび割れが発生することがあり、ひび割れは脱型直後、または脱型から数分した後に発生することが多い。これは、プレキャストコンクリート製品が高温蒸気による促進養生を行うことや、一般的なコンクリートと比べて早期に脱型を行うことで、脱型後に部材内部と表面部に急激な温度差が生じ、部材表面に過剰な引張応力が発生することが原因¹⁾と考えられ、特に冬季においてはこれに起因すると考えられるひび割れが顕著となる場合が多い。この問題に関して一般のコンクリートについては、日本コンクリート工学会のマスコンクリートプログラムなどの温度応力解析ソフトで温度解析、温度応力解析を行うことによってひび割れの発生を予測することがある程度は可能である。しかしながら、蒸気養生を行ったコンクリートは、極初期において常温養生とは大きく異なる温度履歴を受けるため、常温下とは異なる強度発現をする^{2),3),4)}。このため、市販の解析ソフトにより温度解析を行うのは厳密には困難である。

さらに近年では、コンクリート製品工場の周辺環境の市街化や、少子高齢化に伴う作業員不足といった問題に対し、締固め作業の低減を目的として高流動コンクリ

トを採用するケースがある。このような配合の場合、CO₂ 排出量抑制による環境負荷低減対策ならびに海洋構造物などの塩害対策などに有用な高炉スラグ微粉末や、高流動コンクリートの増量材として利用される石灰石微粉末などは、混和材として多く用いられているが、蒸気養生下の強度発現に関する既往の研究は多く見られず、この種の温度応力やひび割れ発生の危険度を検討するためには、蒸気養生下のコンクリートの強度発現性状を把握することが不可欠である。

一方で、蒸気養生を行ったコンクリートの初期強度発

表-1 使用材料

材料名	記号	種類	比重
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.14
混和材	Sg	高炉スラグ微粉 比表面積: 4000 (cm ² /g)	2.92
	LP	石灰石微粉 比表面積: 2500 (cm ² /g)	2.60
細骨材	S	陸砂 吸水率=1.18	2.60
粗骨材	G	碎石 2005 吸水率=0.92	2.66
混和剤	Ad	高性能減水剤(I種)	1.02

表-2 配合

配合名	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	Sg	LP	S	G	Ad
B0L0	31.9	41.0	134	420	0	0	765	1126	5.46
B20L0			134	336	84	0	762	1122	5.46
B0L20			134	336	0	84	759	1117	5.46

*1 鶴見コンクリート株式会社 技術部研究課 主任 (正会員)

*2 東海大学 工学部土木工学科 (学生会員)

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博(工) (正会員)

*4 東海大学 工学部土木工学科 教授 博(工) (正会員)

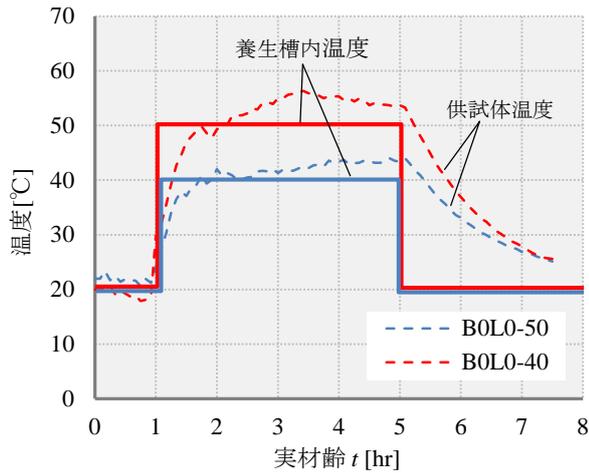


図-1 蒸気養生温度と供試体温度

表-3 実験の組合せ

記号 (配合名-最高温度)	配合 (結合材)	最高養生温度 (°C)
B0L0-40	セメントのみ	40
B0L0-50		50
B20L0-40	スラグ 20%	40
B20L0-50		50
B0L20-40	石灰石 20%	40
B0L20-50		50

現を予測することは、適切な型枠の取り外し時期を定めることが可能となり、プレキャストコンクリート製品の生産効率の向上ならびに品質の安定の面からも重要である。

そこで本研究では、養生温度の違いや混和材の添加が初期圧縮強度に及ぼす影響についてプレキャストコンクリート製品を対象に調査を行い、蒸気養生下におけるコンクリートの初期強度の発現性状について検討することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1に示す。実験に使用したセメントは早強ポルトランドセメントとし、細骨材と粗骨材はそれぞれ陸砂および砕石を使用している。高炉スラグ微粉末には石膏なしの4000ブレーンを、石灰石微粉末は2500ブレーンを用いた。

配合を表-2に示す。検討した配合は、水結合材比を一定(W/P=31.9%)として、混和材を添加しない配合(B0L0)、高炉スラグ微粉末を20%置換した配合(B20L0)ならびに石灰石微粉末を20%置換した配合(B0L20)の3種類とした。

2.2 養生条件

養生条件を図-1に示す。本研究では、プレキャストコンクリート製品の促進養生で行われる蒸気養生パターンのうち、脱型時の強度確保ならびに品質確保の上で強度発現性が非常に重要となる1日2回転で製造するパターンに着目することとした。そのため、コンクリートの練混ぜから脱型までの製造サイクルは6~7時間を目標としており、前置時間を1時間、最高温度の保持時間を4時間という設定としている。また、コンクリートの練上り温度は20°Cとし、最高温度は40°Cと50°Cの2種類について確認することとした。なお、昇温および降温過程は実際に考えられる厳しい場合を想定し、設けていない。

2.2 実験の組合せ

実験の組合せを表-3に示す。コンクリートの配合および養生条件は前述のとおり、セメントのみの配合と高炉スラグ微粉末ならびに石灰石微粉末の混和材を添加した配合の3種類で、蒸気養生の温度パターンは40°Cと50°Cの2種類の計6種類の組合せについて行った。これにより、混和材の添加が蒸気養生コンクリートの強度発現に及ぼす影響を確認することとした。

2.3 試験項目

試験項目は、圧縮強度ならびに供試体温度履歴の測定で、圧縮強度にはφ100×200の円柱供試体を用いた。試験材齢は、4.5、5、5.5、6、6.5、7、8時間の合計7材齢について測定した。供試体温度履歴の測定は、φ100×200の円柱供試体の中心部に熱伝対を埋設し測定した。

3. 強度発現の予測方法

3.1 積算温度法

強度発現の予測式として一般に知られている積算温度法(マチュリティ則)を用いて、蒸気養生下におけるコンクリートの初期材齢における圧縮強度予測の評価を行う。(1)式に積算温度の算出式を示す。

$$M = \int_0^t (T_k + 10) dt \quad (1)$$

ここに、 M ： 積算温度 [°C・hr]

T_k ： 環境温度 [°C]

3.2 有効材齢

有効材齢は、非定常温度履歴を受けたコンクリートの力学特性を評価するために有効であると考えられている。一般に有効材齢とは、水和反応に及ぼす養生温度の影響を養生温度が20°Cの場合の水和度と等価になるように換算した材齢のことを指す。

本研究では、既に提案されている有効材齢(t_e)を求める

いくつかの式を用いて、蒸気養生下における適用性について評価を行った。以下に、その有効材齢の算定式を示す。

(1) マチュリティ則

マチュリティ則による有効材齢を(2)式に示す。この式は、積算温度法(マチュリティ則)に基づいて算出される経験則で、コンクリートの強度を養生温度と養生時間の積で関連づけて表す方法^{5),6)}である。積算温度法((1)式)の値に対して定数(30)を除いて求まるため、(1)式と(2)式は同様の傾向となる。そこで、本研究では積算温度法((1)式)での検討は省略し、次式(2)に示す有効材齢式を代表として検討することとした。

$$t_e = \int_0^t \frac{(T_k + 10)}{30} dt \quad (2)$$

(2) アレニウス則①

コンクリートの水和反応に対する温度依存性を Arrhenius 則に基づいて(4)式⁷⁾のように表されるが、活性化エネルギー(U_h)の算出に関しては、これまで実験的な検討を含めて様々な研究が報告されている^{8),9)}。本研究

でアレニウス則として扱う(3)式は、コンクリート標準示方書¹⁰⁾やマスコンクリートのひび割れ制御指針¹¹⁾、ならびに fib Model Code2010¹²⁾に採用されている式で、活性化エネルギー(U_h)の値を 33kJ/mol に仮定することで、実用性に重点を置いた算出式である。

$$t_e = \int_0^t \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_k}\right] dt \quad (3)$$

ところが fib Model Code2010 によると、ポズラン活性を示す混和材の混合率の高いセメントを使用する場合や、設計時に温度の影響が重要となる場合には、関係式を実験により別途定めるべきであることを指摘している。しかし、本実験では蒸気養生による高温履歴を与えることや、ポズラン活性ではないものの混和材を一部置換して使用するため、この式で仮定している活性化エネルギーと本実験における活性化エネルギーとは、値が異なることが推測され、コンクリートの強度予測に影響を及ぼすことが懸念される。

(3) アレニウス則②

そこで、Saetta ら⁷⁾が提唱した経験則により得られた

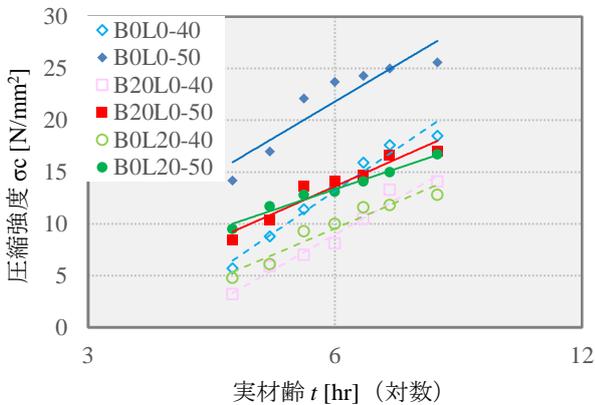


図-2 圧縮強度と実材齢の関係

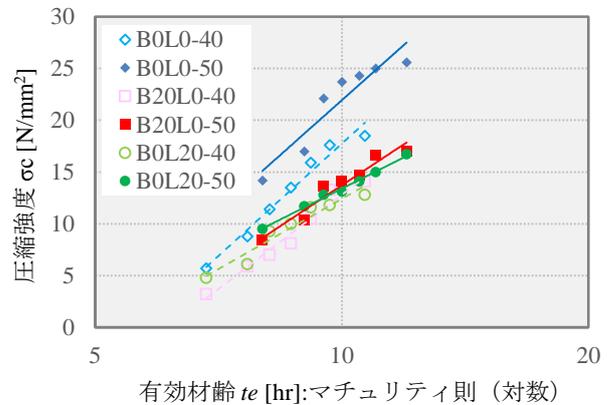


図-3 圧縮強度と有効材齢(マチュリティ則)の関係

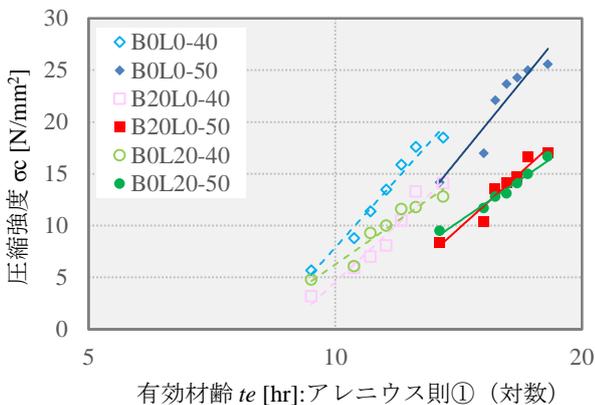


図-4 圧縮強度と有効材齢(アレニウス則①)の関係

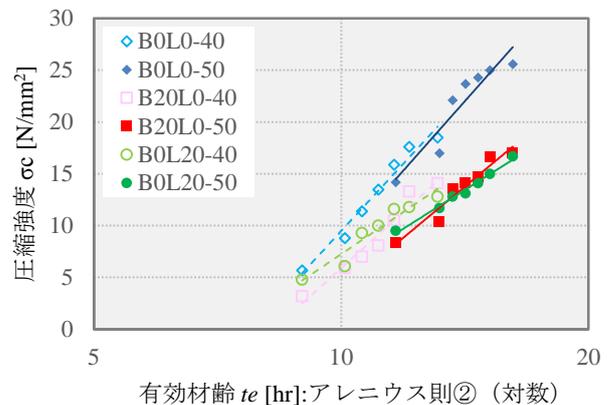


図-5 圧縮強度と有効材齢(アレニウス則②)の関係

活性化エネルギーの算出式を(5)式に示す。この場合も(4)式に示す Arrhenius 則に基づいて有効材齢を算出するが、(3)式で懸念される問題点の解消を目的として、活性化エネルギー環境温度(T_k)を変数に持つ(5)式を用いて算出することとした。

$$t_e = \int_0^t \exp\left[\frac{U_h}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_k}\right)\right] dt \quad (4)$$

$$\frac{U_h}{R} = 4600 \left[\frac{30}{T_k - 263} \right]^{0.39} \quad (5)$$

ここに、 U_h : 活性化エネルギー [J/mol]
 R : 気体定数 [J/mol・K]

4. 実験結果

4.1 圧縮強度結果

実材齢における圧縮強度の試験結果を図-2に示す。なお、図には試験データの回帰を行っているが、既往の研究¹³⁾より初期強度と有効材齢の関係において高い適合性が確認されている対数曲線型を採用した。以下の(6)

式にその回帰式を示す。

$$\sigma_c = a \cdot \log_e(t_e) + b \quad (6)$$

ここに、 σ_c : コンクリートの圧縮強度 [N/mm²]
 t_e : 有効材齢 [hr]

この図から同一配合でそれぞれの圧縮強度を比較した場合、当然のことながら3種類の配合全てにおいて蒸気養生温度が高いほど、圧縮強度は高くなる傾向となった。また、混和材を添加した配合(B20L0, B0L20)は、無添加の配合(B0L0)と比較して、蒸気養生温度を上昇させることによる強度の増進効果が小さくなっていることが分かる。一般に、高炉スラグ微粉末は、初期の強度発現性が低い材料であり、また、石灰石微粉末に至っては、強度増進にほとんど寄与しない材料である。したがって、高炉スラグ微粉末ならびに石灰石微粉末をセメントの内割で置換した場合、置換率の増加に伴いコンクリートの強度発現性が低下すること^{14),15)}が知られており、本実験に関しても同様の結果となったと言えよう。

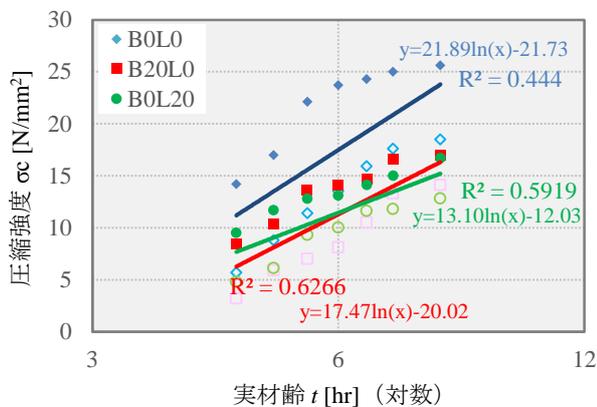


図-6 圧縮強度と実材齢の関係

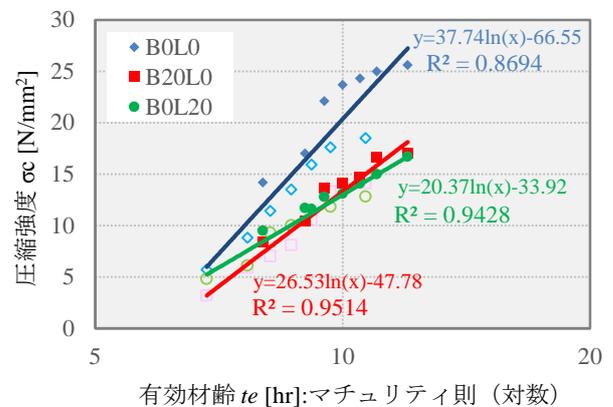


図-7 圧縮強度と有効材齢(マチュリティ則)の関係

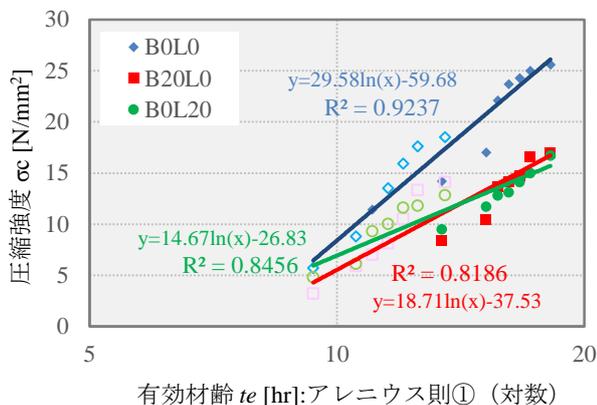


図-8 圧縮強度と有効材齢(アレニウス則①)の関係

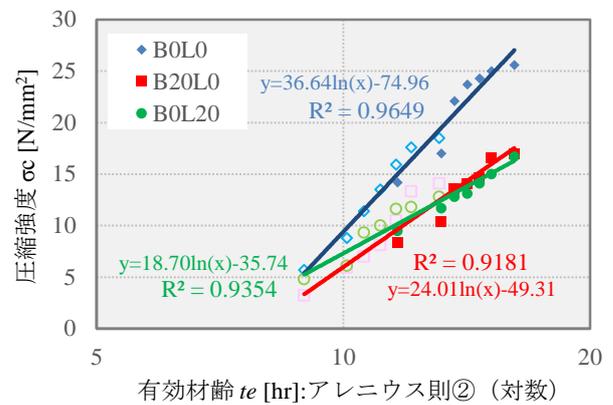


図-9 圧縮強度と有効材齢(アレニウス則②)の関係

4.2 有効材齢算定式の違い

(1) マチュリティ則

図-3に圧縮強度と有効材齢(マチュリティ則)の関係を示す。この図から混和材無添加(BOL0)と混和材添加(B20L0, BOL20)で傾向が異なることが分かる。混和材を添加した場合の4ケースでは、有効材齢が同じであれば蒸気養生温度が異なっても、ほとんど同じ圧縮強度を示している。しかし一方で、混和材が無添加の場合では、蒸気養生温度が異なると、圧縮強度も異なる結果となり、マチュリティ則の有効材齢式では、混和材無添加の初期圧縮強度の推定が難しいことが分かる。

(2) アレニウス則①

次に、図-4に圧縮強度と有効材齢(アレニウス則①)の関係を示す。この図から、3種類全ての配合において蒸気養生温度が40℃と50℃で大きく傾向が異なり、マチュリティ則による有効材齢式(図-3)で見られたような各配合での連続性は全く見られず、横軸に示す有効材齢の方向に分断しており、アレニウス則①の有効材齢式による初期強度の推定は、全配合に対して困難であると考えられる。

(3) アレニウス則②

最後に、図-5に圧縮強度と有効材齢(アレニウス則②)の関係を示す。この図では、3種類全ての配合において蒸気養生温度が異なった場合でも、マチュリティ則ならびにアレニウス則①の有効材齢式で見られたような不連続性は見られず、有効材齢が同じであれば、養生温度が異なっても圧縮強度はほぼ同程度で表せる結果となった。このことから、アレニウス則②の有効材齢式を用いれば、打設直後に高温履歴を受けるといったような蒸気養生を行ったコンクリートであっても、初期の圧縮強度の推定が可能であることが推測できる。しかし、アレニウス則②の有効材齢式を用いても、材齢が極端に短い場合や、養生温度が高温な場合などでは、回帰線から多少外れるといった傾向も確認された。

5. 考察

図-6~9に養生温度に関係なく配合ごとで示した場合の回帰線および重決定係数(R^2)を示す。用いた回帰式は図-2~5と同様で(6)式としている。さらに、図-10にはその時の相関係数(R)を示す。有効材齢を相関関数で見ると、マチュリティ則の有効材齢式では混和材を添加した配合の方が相関性は高く、アレニウス則を基にした①②式では低くなるといった異なる傾向となった。さらに、アレニウス則①と②の式を比較すると、②式の方が混和材添加によると思われる相関性の減少は小さくなり、全配合において相関性が高い結果となった。

次に、実材齢と有効材齢の関係を図-11に示す。養生

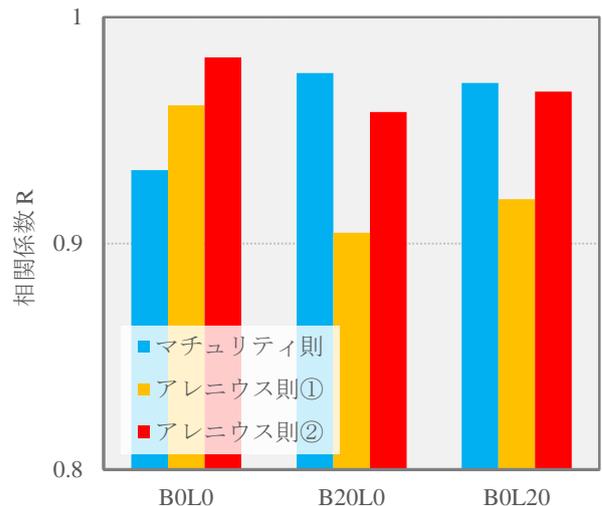


図-10 相関係数

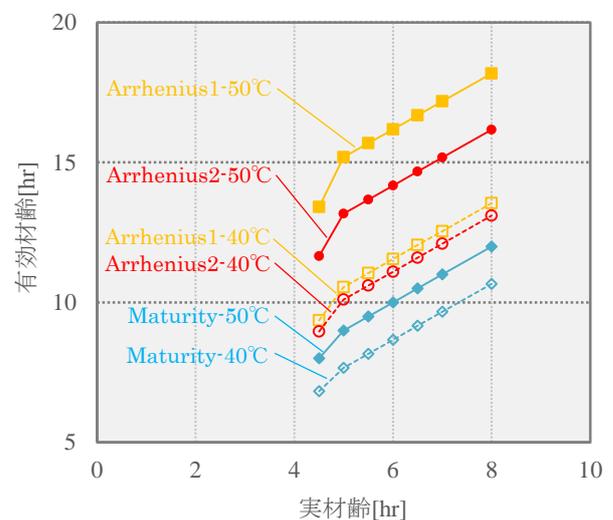


図-11 実材齢と有効材齢の関係

温度が40℃と50℃を比較すると、温度の低い40℃の方が各式の有効材齢の違いは小さく、50℃の方が大きい。また、温度が40℃と50℃の有効材齢の差、すなわち、養生温度上昇が有効材齢に与える影響は、マチュリティ則の式=1.3hrが一番小さく、アレニウス則①の式=4.6hrが一番大きい結果となった。これは、アレニウス則①の有効材齢式で懸念していた活性化エネルギー(U_h)を仮定していることによる影響と考えられ、アレニウス則①の有効材齢式は $U_h=33\text{kJ/mol}$ 一定としているが、②式の40℃で算出すると $U_h=31.3\text{kJ/mol}$ 、50℃の場合は 29.2kJ/mol と高温なほど小さくなる。そのため、アレニウス則①の有効材齢式では、積算養生温度が大きくなるほど有効材齢も大きくなり、相関性が低くなったと推定される。また、混和材を添加した場合の相関性の低下も同様に整理でき、反応速度定数である活性化エネルギーが混和材の添加により増加した影響と推測される。

以上より、アレニウス則②の有効材齢式、すなわち Saetta らの活性化エネルギーの経験則ならびにアレニウス則に基づく有効材齢を用いることで、コンクリートの初期強度発現に及ぼす蒸気養生の影響をより適切に表現できる可能性があることが分かった。しかし一方で、マチュリティ則ならびにアレニウス則を用いた強度推定などの既往の研究では、主に中長期材齢における適合性について検討したもの^{5),6),16)}がほとんどで、プレキャストコンクリート製品での蒸気養生過程のような初期の高温履歴や、早期脱型時での圧縮強度を推定した研究に関しては、ほとんど見受けられない。そのため、本実験で確認されたような材齢が極端に短い場合や、養生温度が高い場合に見られる推定強度との不一致などについては、今後の研究の課題としたい。

6. まとめ

本研究では、養生条件や配合条件が初期圧縮強度に及ぼす影響を検討し、その関係について積算温度や有効材齢との適合性を実験的に検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 異なる温度履歴を受けた供試体の強度発現に及ぼす混和材添加の影響は、添加した場合と比べて無添加の方がより温度の影響を受けることが分かった。
- (2) マチュリティ則は、蒸気養生を短時間で行った混和材を添加していないコンクリートの強度推定には不適切である。
- (3) 本実験の範囲内ではあるが、温度と水和反応速度の関係を表す Arrhenius 則ならびに Saetta らの経験則を組み込んだ有効材齢の式を用いることにより、同一配合であれば蒸気養生コンクリートの強度を適切に推定できる可能性があることが分かった。

今回の研究では、蒸気養生に関して最高温度が 40℃と 50℃の場合のみ検討を行ったが、今後は、さらに高温の場合や、前置きや最高温度の保持時間なども検討対象に加えて研究を行いたい。

参考文献

- 1) 丸山貴吉, 柄澤英明, 福室順也, 伊達重之: 早期脱型するコンクリート製品の膨張材の影響, 土木学会第 70 回年次学術講演会, pp.349-350, 2015
- 2) 庄司芳之, 竹下治之, 佐原晴也: 高流動コンクリートの硬化後の品質に及ぼす蒸気養生の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, 1994
- 3) 丸山晃平, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎: 蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究, コンクリート工学年次

論文集, Vol.33, No.2, 2011

- 4) 佐々木謙三, 片山強, 原田哲夫: 蒸気養生コンクリートの力学的特性に及ぼす蒸気養生条件と結合材種類の影響, 土木学会西部支部研究発表会, V-031, 2011.3
- 5) 伊藤憲雄, 三橋博三, 桐越一紀: 養生過程で温度履歴を受けたコンクリートの活性化エネルギーと有効材齢, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.1, 2004.1
- 6) 入谷桂史郎, 根木崇文, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの引張クリープに関する研究, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.201-213, 1999.5
- 7) Anna V. Saetta, Bernhard A. Schrefler and Renato V. Vitaliani: The Carbonation of Concrete and the Mechanism of Moisture, Heat and Carbon Dioxide Flow Through Porous Materials, Cement and Concrete Research, Vol.23, pp.761-772, 1993
- 8) 伊藤憲雄, 三橋博三, 桐越一紀: 養生過程で温度履歴を受けたコンクリートの活性化エネルギーと有効材齢, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.1, 2004.1
- 9) 谷口円, 桂修, 佐川孝広, 濱幸雄: 強度増進の温度依存性に及ぼすセメント鉱物組成の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 661 号, pp.443-448, 2011.3
- 10) 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2013
- 11) マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 日本コンクリート工学会, 2008
- 12) Model Code 2010, Final Draft, Vol.1, fib bulletin Vol.65, fib, 2013
- 13) 菊地俊文, 片山行雄, 瀧論, 黒田泰弘: 現場内プレキャスト部材に用いるコンクリートのマチュリティ則に基づく初期強度発現の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 14) 尾関規史, 出光隆, 山崎竹博, 石松宗一郎: 高微粉砕した高炉スラグ微粉末の配合と物理的諸性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, 2000
- 15) 加藤弘義, 中村明則, 土井宏行, 宮川豊章: 石灰石微粉末を使用した高流動コンクリートの強度ならびに自己収縮特性, 材料, Vol.50, No.5, pp.543-549, 2001.5
- 16) 木ノ村幸士, 石田哲也: 低水結合材比モルタルの圧縮強度増進性状と温度時間関数の適用について, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-471, 2015.9