

論文 養生方法がプレキャストコンクリートの有効材齢と圧縮強度の関係に及ぼす影響

新貝 勝信*1・齋藤 尚*2・大野 優希*3・橋本 紳一郎*4

要旨：プレキャストコンクリート製品の製造において、セメントの種類や環境温度に応じて、蒸気養生を最適化する手法を確立するため、養生方法が有効材齢と圧縮強度の関係に及ぼす影響について検討した。その結果、蒸気養生は恒温養生よりも同一有効材齢における圧縮強度が低下する場合があることを確認した。また、有効材齢と圧縮強度の結果から求めた回帰式を用い、脱型強度の確保に必要な有効材齢の推定値を算出した場合、蒸気養生は恒温養生よりも有効材齢の推定値が増加することを確認した。また、恒温養生の結果から求めた回帰式を用いて、蒸気養生下での目標圧縮強度を安全側に推定する手法を示した。

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

1. はじめに

プレキャストコンクリート（以下、PCa）製品工場では、1日1サイクルで製品を製造する場合、材齢18時間から24時間で脱型することが多く、所定の脱型強度を得るために、一般に蒸気養生が行われる。また、PCa製品の製造段階で排出されるCO₂の多くがこの蒸気養生に由来している¹⁾。

現在、各産業界において、CO₂排出量削減の取組みが実施されている。PCa製品分野においては、セメントの一部を高炉スラグ微粉末などの産業副産物に置換するなどのCO₂排出量の少ない材料に転換する方法²⁾や、硬化促進剤の利用により蒸気養生の最高温度を低減してボイラー燃料の消費を削減する方法³⁾など、製造段階におけるCO₂排出量の削減が検討されている。ここで、製造段階の検討に着目すると、PCa製品の管理強度を確保しつつ、所定の脱型強度が得られるように、蒸気養生の最高温度や保持時間を環境温度に応じて最適化することで、蒸気養生によるCO₂排出量を削減できると考えられる。

このためには、コンクリートの初期強度発現性を精度よく推定する必要がある。コンクリートの強度発現に関する推定手法については、従来から積算温度や有効材齢などのマチュリティで整理されることが多い^{4),5),6)}。中でも蒸気養生を行ったコンクリートの強度推定には、温度による水和反応速度への影響を反映させたアレニウス則に基づく有効材齢の適用性が高いことが報告されている⁷⁾。ただし、蒸気養生を行ったコンクリートの強度推定に関する研究は、レディーミクストコンクリートを対象とした場合よりも少なく、十分な知見が蓄積されていない。

本研究では、セメントの種類や環境温度に応じて、蒸

気養生を最適化する手法を確立するため、恒温養生または蒸気養生を行ったコンクリートの温度と圧縮強度の結果を整理し、養生方法が有効材齢と圧縮強度の関係に及ぼす影響について実験により検討した。そして、有効材齢と圧縮強度の関係から求めた回帰式の推定精度を検討した。また、PCa製品工場における回帰式の適用を想定し、蒸気養生下での目標圧縮強度を安全側に推定する手法について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験構成

本研究では、普通ポルトランドセメント（以下、NC）および早強ポルトランドセメント（以下、HC）を対象として、環境温度を5℃、10℃、20℃および30℃とし、恒温養生または蒸気養生を施したコンクリートの温度および圧縮強度を測定した。次に、各養生方法下での有効材齢と圧縮強度の関係を整理し、養生方法が有効材齢と圧縮強度の関係に及ぼす影響について検討した。

また、本研究では、午後に製品を製造し、翌日午前中に脱型を行うような1日1サイクルでの製造工程を想定した。なお、PCa製品の脱型強度は、JISやコンクリート標準示方書などでは明確に規定されておらず、配合や製品寸法に応じて、8～15N/mm²程度で管理することが多い。本研究では、脱型強度を15N/mm²に設定し、脱型強度の確保に必要な有効材齢の推定値を算出した。

2.2 使用材料および配合

表-1にコンクリートの使用材料を示す。セメントにはNCおよびHCを用いた。細骨材には山砂を、粗骨材には硬質砂岩碎石を用いた。また、化学混和剤には高性

*1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 研究員 修(工) (正会員)

*2 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 副主任研究員 博(工) (正会員)

*3 千葉工業大学大学院 創造工学研究科 都市環境工学専攻 (学生会員)

*4 千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科 教授 博(工) (正会員)

表－1 使用材料

区分	記号	材料名
水	W	上水道水
セメント	NC	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15g/cm ³
	HC	早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³
細骨材	S	山砂, 表乾密度 2.58 g/cm ³
粗骨材	G	硬質砂岩碎石, 表乾密度 2.64g/cm ³
化学混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤
	AE	アルキルエーテル系 AE 剤

表－2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	NC	HC	S	G
NC	45	46	170	378	0	789	948
HC	45	46	170	0	378	788	947

能減水剤および AE 剤を用いた。表－2 にコンクリートの配合を示す。水セメント比（以下、W/C）は 45%とした。また、コンクリートのフレッシュ性状は、スランブが 18±2.5cm, 空気量が 4.5±1.5%となるよう、化学混和剤の添加率を適宜調整した。

コンクリートの練混ぜは、環境温度 5℃, 10℃, 20℃および 30℃の恒温室において、容量 55L の強制二軸練りミキサを用いて行った。コンクリートの練混ぜ方法は、セメント、細骨材および粗骨材を 15 秒間練り混ぜた後、混和剤を含む水を加え、90 秒間練り混ぜてから排出した。

2.3 測定項目

測定項目は、フレッシュ性状、強度性状および温度履歴とした。フレッシュ性状は、練上り直後のコンクリートを対象に、スランブ、空気量および練上り温度を測定した。強度性状は、φ100×200mm の供試体を用いて圧縮強度を測定した。圧縮強度試験用の供試体は、1 水準あたり 18 本とし、材齢 18 時間、1 日、2 日、3 日、7 日、14 日にて圧縮強度を測定した。なお、材齢 18 時間強度の測定用以外の供試体は材齢 1 日で脱型し、その後はコンクリート製造時と同じ環境温度で気中養生を行った。供試体の温度は、φ100×200mm の供試体の中心部に T 型熱電対を挿入し、15 分間隔で計測して、有効材齢の算出に用いた。温度の測定用の供試体は、1 水準あたり 1 本とした。

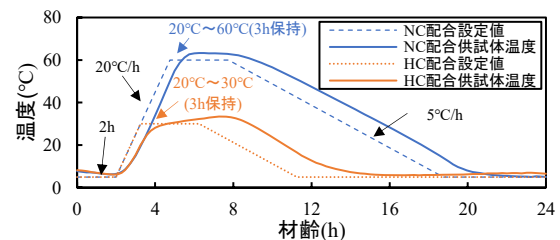
2.4 養生方法

養生方法は、恒温養生および蒸気養生の 2 種類とした。恒温養生の環境温度は、5℃, 10℃, 20℃および 30℃の 4 水準とした。なお、各環境温度での湿度は管理していなかったが、5℃および 10℃では 90±5%R.H., 20℃および 30℃では 60±5%R.H.の範囲であった。蒸気養生は、各環境温度でコンクリートを製造後、表－3 および図－1 に示す蒸気養生条件にて実施した。前養生は 2 時間、昇温速度は 20℃/h, 降温速度は 5℃/h の一定とし、最高温度を 20℃, 30℃, 45℃および 60℃に変化させた。なお、前養生中の温度は、コンクリート製造時と同じ温度とし、

表－3 養生条件

養生条件名*	環境温度 (°C)	前養生 (h)	最高温度 (°C)	実施配合	
				NC	HC
5-2-20	5	2	20	-	○
5-2-30			30	-	○
5-2-45			45	○	○
5-2-60		6	60	○	-
5-6-45			45	○	-
5-6-60			60	○	-
10-2-20	10	2	20	-	○
10-2-30			30	-	○
10-2-45			45	○	-
10-2-60			60	○	-
20-2-30	20	2	30	○	-
20-2-45			45	○	-
20-2-60			60	○	-
30-2-45	30	2	45	○	-
30-2-60			60	○	-

*環境温度(°C)-前養生時間(h)-最高温度(°C)



図－1 蒸気養生パターンと供試体温度の一例

最高温度の保持時間は 3 時間とした。また、NC 配合の一部水準では、前養生 6 時間を加えた。最高温度の保持時間終了後は、コンクリート製造時と同じ環境温度まで降温した。

3. 有効材齢および回帰式の算定方法

3.1 有効材齢の算定方法

有効材齢の算定方法として、積算温度やアレニウス則を用いる方法などが提案されている。丸山ら⁷⁾は、式(1)に示すアレニウス則による有効材齢式と、式(2)に示す Saetta ら⁸⁾の経験則に基づく活性化エネルギーの算出式を用いて、蒸気養生を行ったコンクリートの強度発現性の推定を行い、積算温度を用いる場合よりも推定精度が高いことを示している。本研究では、恒温、蒸気養生ともに式(1)および(2)を用いて有効材齢を算出した。

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

$$\frac{U_h}{R} = 4600 \left[\frac{30}{T_k - 263} \right]^{0.39} \quad (2)$$

ここに、 t_e ：有効材齢 (hours), t ：材齢 (hours), U_h ：活性化エネルギー (J/mol), R ：気体定数 (8.314J/mol・K), T_k ：供試体温度(°C)

表-4 フレッシュ性状の結果 (NC 配合)

環境温度 (°C)	SP 添加率 (C×%)	AE 添加率 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
5	0.50	0.0020	19.5	3.9	7
10	0.50	0.0015	20.5	3.8	12
20	0.60	0.0020	18.0	4.6	22
30	0.65	0.0025	19.0	4.4	30

3.2 回帰式の算定方法

コンクリートの強度発現式として、これまでロジスティック曲線やゴンベルツ曲線などが検討されており⁹⁾、既往の研究では、レディーミクストコンクリートを対象としたものが多い。そこで、蒸気養生を行ったコンクリートを対象として事前検討を行った結果、推定精度はロジスティック曲線よりもゴンベルツ曲線の方が高かったため、恒温、蒸気養生ともに式(3)にて回帰式を算出した。なお、式(3)に示す $f'_c(t_n)$ には、終局強度を用いることが一般的である。一方で、PCa 製品工場では材齢 14 日を管理材齢とすることが多いため、本研究では材齢 t_n を 14 日とした。また、 $f'_c(t_n)$ には回帰式の推定に用いた実験結果の中から、材齢 14 日における圧縮強度の最大値を採用した。

$$f'_c(t_e) = f'_c(t_n) \cdot \exp\left(-a \cdot \left(\frac{1}{t_e}\right)^b\right) \quad (3)$$

ここに、 $f'_c(t_e)$: 圧縮強度 (N/mm²)、 a, b : 実験定数、 $f'_c(t_n)$: 材齢 t_n における圧縮強度 (N/mm²)、材齢 t_n : NC, HC 配合ともに材齢 14 日

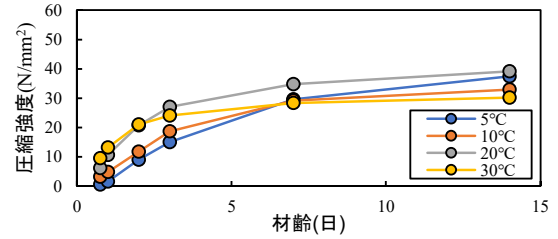
4. 実験結果

4.1 フレッシュ性状

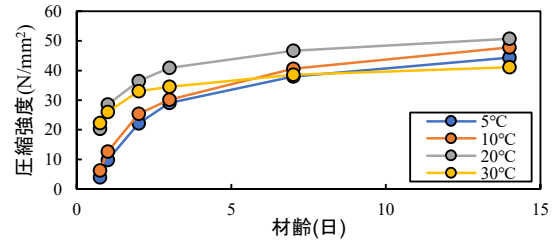
表-4 にフレッシュ性状の一例として、各環境温度下での NC 配合の測定結果を示す。スランプは 18.0~20.5cm、空気量は 3.8~4.6%の範囲であり、目標値を満足した。なお、HC 配合では、スランプは 17.5~20.0cm、空気量は 4.6~5.3%の範囲であり、NC 配合と同様に目標値を満足している。化学混和剤の添加率については、高性能減水剤は環境温度が高いほど多くなる傾向であり、AE 剤は環境温度に関わらず、概ね同程度であった。また、HC 配合でも、NC 配合と同様の傾向を確認した。

4.2 養生方法が有効材齢と圧縮強度の関係に及ぼす影響

図-2 に恒温養生下での圧縮強度の結果を示す。初期強度は、NC, HC 配合ともに、環境温度が高いほど大きい傾向を確認した。また、材齢 14 日での圧縮強度は、両配合ともに、環境温度 20°Cで最も大きく、その次に環境温度 5°Cもしくは 10°Cの順となり、環境温度 30°Cで最も小さい結果となった。図-3 に恒温養生下での有効材齢

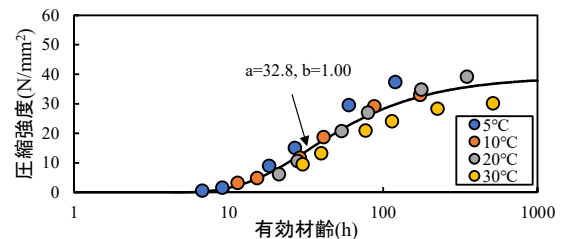


(a) NC 配合

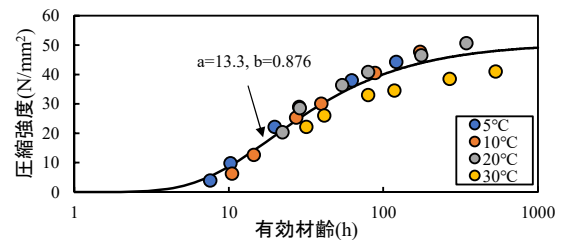


(b) HC 配合

図-2 恒温養生下での圧縮強度



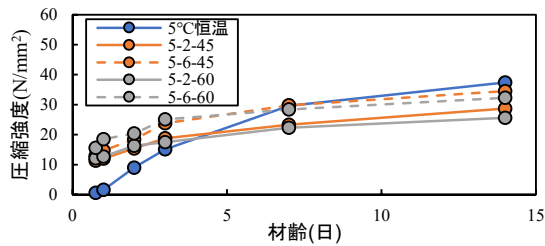
(a) NC 配合



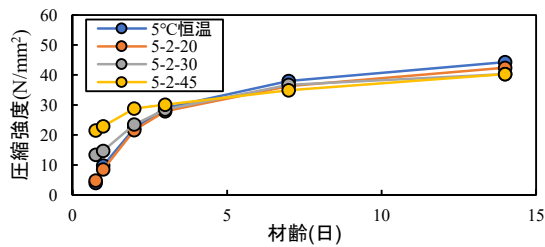
(b) HC 配合

図-3 恒温養生下での有効材齢と圧縮強度の関係

と圧縮強度の関係を示す。また、有効材齢と圧縮強度の結果から求めた回帰式についても併せて示す。NC, HC 配合ともに、環境温度 5°C, 10°C, 20°Cでは、同一有効材齢における圧縮強度が同程度であった。一方、環境温度 30°Cでは、同一有効材齢に対する圧縮強度が他の環境温度よりも小さく、回帰式から危険側に乖離する傾向を確認した。吉野ら¹⁰⁾は、30°Cや 40°Cなどの高温下で養生された場合、5°C~10°Cなどの低温下で養生された場合と比較して、長期材齢における同一積算温度での圧縮強度が低下することを報告している。マチュリティに有効

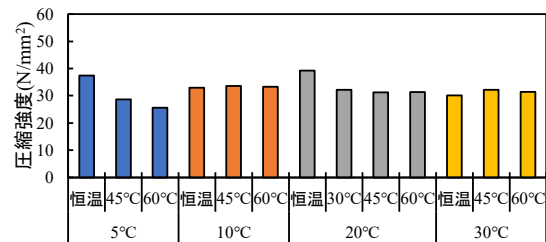


(a) NC 配合

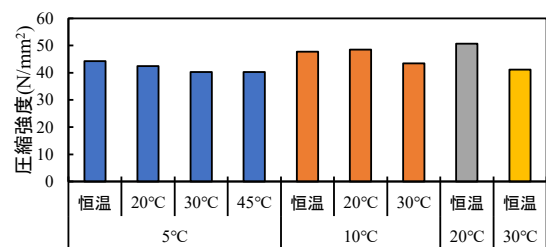


(b) HC 配合

図-4 蒸気養生下での圧縮強度 (5°C)



(a) NC 配合



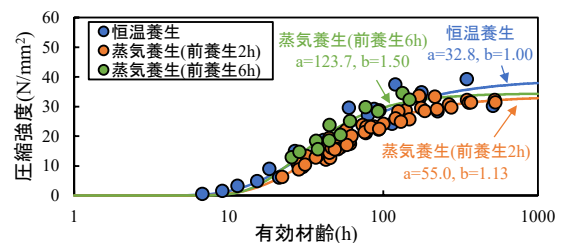
(b) HC 配合

図-5 蒸気養生下での材齢 14 日の圧縮強度

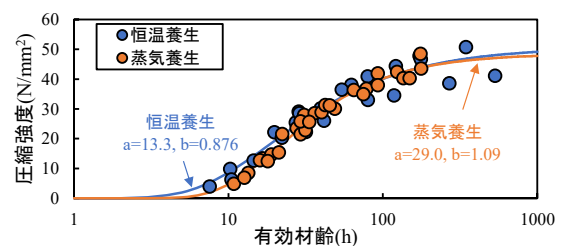
材齢を用いた本研究でも、材齢の検討範囲が比較的短いものの、同様の傾向が見られた。

図-4 に環境温度 5°C における蒸気養生下での圧縮強度の結果を示す。NC 配合では、前養生 2 時間の場合、最高温度 45°C、60°C とともに、恒温養生よりも初期強度は増加したものの、材齢 14 日の圧縮強度は顕著に低下した。また、前養生 6 時間の場合、前養生 2 時間よりも初期強度および材齢 14 日の圧縮強度は増加し、また、材齢 14 日の圧縮強度が恒温養生に近づくことを確認した。次に、HC 配合では、材齢 14 日の圧縮強度は、最高温度が高いほど小さい傾向を示したものの、NC 配合と比較すると、恒温養生との差異は小さい結果となった。丸山ら¹¹⁾は、前養生を長くすることで、前養生中に凝結が進行し、蒸気養生中に大きい空隙が小さい空隙に変わることによってコンクリートが緻密化すると報告している。本研究においても、NC 配合の前養生 2 時間の場合では、凝結が進む前に高温履歴を受けたことで、粗大な空隙が形成され、材齢 14 日の圧縮強度が恒温養生よりも顕著に小さくなったと考えられる。

図-5 に前養生を 2 時間とした蒸気養生下での材齢 14 日の圧縮強度の結果を示す。NC 配合では、環境温度によって、圧縮強度は恒温養生と蒸気養生が同程度、もしくは蒸気養生が恒温養生よりも小さい結果となった。こ HC 配合では、環境温度 5°C、10°C とともに、圧縮強度は蒸気養生が恒温養生よりもわずかに小さい結果となった。ただし、HC 配合では、環境温度 20°C および 30°C では蒸気養生を行っていないため、NC 配合との比較については、今後の課題とする。



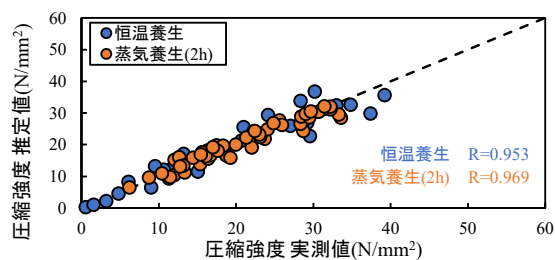
(a) NC 配合



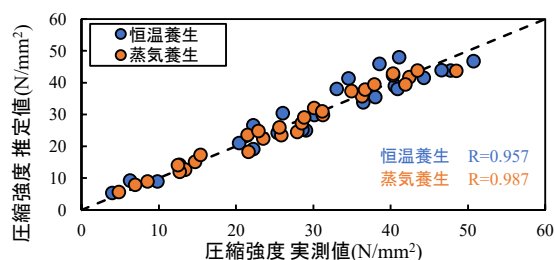
(b) HC 配合

図-6 恒温および蒸気養生下での有効材齢と圧縮強度の関係

図-6 に恒温および蒸気養生下での有効材齢と圧縮強度の関係を示す。なお、各養生方法を対象にそれぞれ求めた回帰式も併せて示す。NC 配合では、前養生 2 時間の場合、同一有効材齢での圧縮強度は概ね蒸気養生の方が恒温養生よりも小さい結果となった。一方で、前養生 6 時間の場合、同一有効材齢での圧縮強度は恒温養生と同等以上となった。次に、HC 配合では、同一有効材齢での圧縮強度は、恒温養生と蒸気養生で概ね同程度となった。ただし、恒温養生 30°C の結果については、同一有効



(a) NC 配合



(b) HC 配合

図-7 圧縮強度の実測値と各養生方法の結果から求めた回帰式を用いて算出した推定値の関係

表-5 脱型強度の確保に必要な有効材齢の推定値

配合	有効材齢の推定値(h)		
	恒温養生	蒸気養生(2h)	蒸気養生(6h)
NC	34.2	42.0	31.1
HC	15.3	18.8	—

材齢における圧縮強度が、蒸気養生よりも小さい結果となり、他の環境温度とは異なる傾向を示した。

4.3 回帰式の精度検証

図-7 に圧縮強度の実測値と各養生方法の結果から求めた回帰式を用いて算出した推定値の関係を示す。NC、HC 配合ともに、実測値と推定値の相関係数は、蒸気養生の方が恒温養生よりも高い結果となった。また、恒温養生では、圧縮強度の実測値よりも推定値の方が大きいものが散見され、危険側に推定していることを確認した。これは、恒温養生の環境温度 30℃での結果が、回帰式から乖離する傾向が見られたことから、その影響を受けたと考えられる。ただし、恒温養生の相関係数は、NC 配合で 0.953、HC 配合で 0.957 であり、相関性が高いことを確認した。

表-5 に各養生方法における脱型強度の確保に必要な有効材齢の推定値を示す。有効材齢の推定値は、各養生条件の有効材齢と圧縮強度との関係からそれぞれ求めた回帰式によって算出している。NC 配合では、前養生 2 時間の場合、恒温養生と比較して、有効材齢が 7.8 時間長くなることを確認した。一方で、前養生 6 時間の場合、有効材齢は恒温養生よりも 3.1 時間短くなることを確認した。HC 配合では、NC 配合と比較すると、恒温養生と蒸気養生の差異は小さくなるものの、脱型強度の確保に

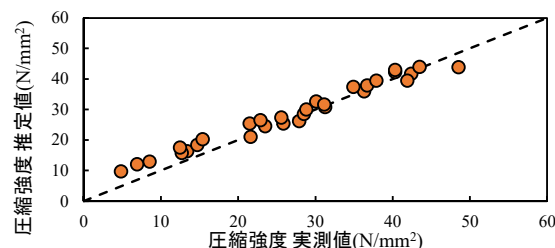


図-8 圧縮強度の実測値と恒温養生の回帰式から算出した推定値の関係 (HC 配合)

表-6 残差の統計値 (HC 配合)

統計値	20N/mm² 未満	20N/mm² 以上
最大値	-2.94	4.60
最小値	-5.14	-4.90
平均値	-4.20	-0.827
標準偏差	0.833	2.11

必要な有効材齢は、蒸気養生の方が恒温養生よりも 3.5 時間長くなることを確認した。

4.4 実用を想定した回帰式の適用方法

PCa 製品工場における回帰式の適用を想定すると、製品製造の工程上、蒸気養生を施したコンクリートについて、初期材齢の圧縮強度のデータを取得することは難しいことが想定される。このため、蒸気養生を施したコンクリートの脱型強度の確保に必要な有効材齢を推定する際には、恒温養生の結果から求めた有効材齢と圧縮強度の回帰式を用いることが望ましい。また、蒸気養生を施すことで、恒温養生よりも同一有効材齢における圧縮強度が低下する場合があることを踏まえると、圧縮強度を推定する際には、ある程度の安全率を考慮する必要がある。このため、恒温養生の結果から求めた回帰式と蒸気養生下での圧縮強度の実測値を対比し、恒温養生の結果から求めた回帰式による、蒸気養生下での圧縮強度の推定精度について検討を実施した。

図-8 に蒸気養生下での圧縮強度の実測値と恒温養生の結果から求めた回帰式を用いて算出した推定値の一例として、HC 配合での結果を示す。圧縮強度の推定値が実測値よりも全体的に大きくなっており、圧縮強度を危険側に評価することを確認した。なお、NC 配合でも、同様の傾向を確認した。

表-6 に強度範囲 20N/mm² 未満における残差の統計値を示す。なお、残差は圧縮強度の実測値から推定値を差し引いて算出した。強度範囲 20N/mm² 未満に着目すると、残差の絶対値が最大となる値は、5.14 N/mm² であった。これは、圧縮強度を実測値よりも最大で 5.14N/mm² 危険側に評価することを意味している。したがって、恒温養生の結果から求めた回帰式を用いて、蒸気養生下での脱型強度の確保に必要な有効材齢を推定する際には、残差

の絶対値が最大となる値を考慮した上で、目標脱型強度を設定することが望ましい。つまり、目標脱型強度は、脱型強度 15 N/mm² に残差の絶対値が最大となる値を加えると 20.1 N/mm² になる。この場合、有効材齢は 21 時間となり、表-5 に示す恒温養生の有効材齢よりも大きい値となるため、圧縮強度を安全側に評価できると考えられる。NC 配合においても、同様の手法により有効材齢を推定すると 54 時間となり、表-5 に示す恒温養生の有効材齢よりも大きい値となることを確認した。なお、実用上における脱型強度の確保に必要な有効材齢の算定手法に関しては、対象とするデータの妥当性について検討が必要であるとともに、目標とする圧縮強度と有効材齢に対する安全率の設定方法についても検討の必要性があると考えられる。

5. 結論

本研究では、セメントの種類や環境温度に応じて、蒸気養生を最適化する手法を確立するため、養生方法がプレキャストコンクリートの有効材齢と圧縮強度の関係に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 恒温養生下において、NC および HC 配合ともに、環境温度 30℃のみ他の環境温度よりも同一有効材齢での圧縮強度が小さくなった。
- (2) NC 配合では、前養生 2 時間の場合、同一有効材齢での圧縮強度は、蒸気養生の方が恒温養生よりも小さい傾向が見られた。また、前養生 6 時間の場合、同一有効材齢での圧縮強度は、恒温養生と同等以上となった。HC 配合では、同一有効材齢での圧縮強度は、恒温養生と蒸気養生で概ね同程度であった。
- (3) NC, HC 配合ともに、蒸気養生を施すことで、脱型強度の確保に必要な有効材齢の推定値は、増加する場合があることを確認した。特に、NC 配合では、脱型強度の確保に必要な有効材齢に対する養生方法の影響が大きいことを確認した。
- (4) 恒温養生の結果から求めた回帰式を用いて、蒸気養生下での脱型強度の確保に必要な有効材齢を推定する際には、脱型強度に残差の絶対値が最大となる値を加えた目標脱型強度を設定することで、有効材齢の推定値が大きくなり、圧縮強度を安全側に評価できると考えられる。

本研究は室内試験の結果であり、今後は PCa 製品の実製造を想定し、セメントの種類や環境温度に応じた蒸気養生の最高温度および保持時間の設定方法について検討

を進めていく。

参考文献

- 1) 河合研至，藤木昭宏，赤崎大希，徳久陽一：プレキャストコンクリートの環境負荷低減策に関する検討，コンクリート工学論文集，Vol.25，pp.35-44，2014
- 2) 堀口賢一，松本淳一，川村圭亮，坂本淳：低炭素型コンクリートを使用したコンクリート二次製品の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.213-218，2016
- 3) 中村敏之，井村尚則，中村憲正，二井谷教治：蒸気養生を不要としたプレキャストコンクリート製品の製造，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.1009-1014，2024
- 4) 氏家勲，大野浩二：各種の成長曲線によるコンクリートの早期強度推定に関する検討，土木学会論文集，No.798/VI68，pp.51-61，2005.9
- 5) 菊地俊文，片山行雄，瀧諭，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，pp.415-420，2013
- 6) 瀧川瑞季，勝岡夏那，橋本紳一郎，伊達重之：プレキャストコンクリートの脱型時の強度予測に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.353-358，2021
- 7) 丸山貴吉，中嶋望，橋本紳一郎，伊達重之：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.577-582，2016
- 8) Anna V. Sactta, 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
- 9) 谷口円，桂修，濱幸雄，吉野利幸：水セメント比の適用範囲を拡張したコンクリート強度予測式の提案，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 641 号，pp.1205-1210，2009.7
- 10) 吉野利幸，大楽隆男，鎌田英治：高温域を含む各種養生温度でのコンクリート強度増進性状，セメント・コンクリート論文集，Vol.45，pp.370-375，1991
- 11) 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，Vol.33，No.2，pp.51-576，2011