

論文 β -C₂S を主成分とする CO₂ 吸収・硬化セメントコンクリートの各炭酸化養生条件における炭酸化速度および硬化性状

伊東 可恋*1・石田 征男*2・林 建佑*3・米山 暁*1

要旨: 本研究では、温度・湿度・CO₂濃度といった炭酸化養生条件が、 β -C₂S を主成分とした CO₂ 吸収・硬化セメントを使用したコンクリートの炭酸化速度および硬化性状に与える影響を評価した。その結果、本検討で設定した条件の範囲内では、温度の上昇、湿度の低下、および CO₂ 濃度の上昇、それぞれに伴って炭酸化速度係数が増加した。この結果より各炭酸化養生条件をパラメーターとした炭酸化速度係数の予測式を作成したところ、予測値と実験値はよく一致した。また、いずれの炭酸化養生条件で製造したコンクリートにおいても、炭酸化深さから算出した炭酸化面積率と圧縮強度は直線関係で表すことができた。

キーワード: CO₂ 吸収・硬化セメント, コンクリート製品, 炭酸化養生条件, 炭酸化速度

1. はじめに

近年、CO₂ をコンクリート中に固定化させる環境配慮型コンクリートが開発され、実用化に向けた検討が進められている。著者らは、CO₂ 排出量の削減と廃棄物活用の両立を目的として、普通ポルトランドセメント(OPC)と同様の鉱物で構成され、 β -C₂S を主要成分とする CO₂ 吸収・硬化セメントの研究を進めている^{1,2)}。この CO₂ 吸収・硬化セメントは OPC よりも CaO の含有率が低く、低温度でクリンカーを焼成できるため、セメント製造時の CO₂ 排出量を低減できる。さらに炭酸化養生を行うことで CO₂ と反応し硬化・強度発現する特徴を有している。

一方、CO₂ 吸収・硬化セメントを用いたコンクリートの養生には、高濃度炭酸化養生設備を必要とすることから、コンクリート製品としての使用が主な用途として想定される。一般にコンクリート製品は、製品自体の強度を確認することでその品質を管理されており、使用するコンクリートが所要の強度を有していることが必要である。このため、CO₂ 吸収・硬化セメントを用いたコンクリートにおいては、要求される強度を発現するために必要な炭酸化養生期間を明確にするとともに、効率的に炭酸化を促進し、炭酸化養生期間を短縮することが重要となる。

コンクリートの炭酸化速度に影響する環境要因としては、温度、湿度、CO₂濃度などが挙げられる。例えば、鄭ら³⁾は、コンクリートの炭酸化において、湿度が重要な因子であることを述べており、40~50%RH 程度の湿度において、炭酸化速度係数が大きくなるとしている。また、魚本ら^{4,5)}は、温度と CO₂濃度の影響について検討しており、10~40℃の範囲内では、温度が高いほど、中性化が進むことを述べている。また、CO₂濃度の影響につ

いては、CO₂ ガス濃度の項を含む中性化速度式を表すことにより、CO₂ ガス濃度による促進中性化の促進倍率を明らかにしている。しかし、これらの研究は、ある程度硬化が進んだ汎用的なセメントコンクリートを対象としており、本研究で対象としているような CO₂ 吸収・硬化セメントを使用したコンクリートには当てはまらない可能性がある。渡邊ら⁶⁾は、本研究で対象としているような CO₂ を吸収して硬化する3種類のセメントを対象に実験を行っており、使用する基材セメントや混和材の種類によっては、CO₂濃度が高いほど炭酸化深さが小さくなる場合があるなど、上述の知見とは異なる結果を示している。このように、使用する材料ごとに、炭酸化養生条件が炭酸化速度に与える影響を把握することは重要であると考えられる。

本研究では、 β -C₂S を主成分とした CO₂ 吸収・硬化セメントを使用したコンクリート⁷⁾を対象として、温度、湿度および CO₂濃度といった炭酸化養生条件がコンクリートの炭酸化速度ならびに硬化性状に与える影響を明らかにすることを目的として検討を行った。

表-1 使用材料

材料名	記号	摘要
水	W	上水道水(福岡県田川郡)
セメント	C	CO ₂ 吸収・硬化セメント 密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3,300cm ² /g
細骨材	S	静岡県掛川市産, 山砂 密度: 2.59g/cm ³ , 粗粒率: 2.68
粗骨材	G	茨城県桜川市産, 硬質砂岩砕石 2005 密度: 2.65g/cm ³ , 実積率: 58.3%
混和剤	AD	AE 減水剤(1種) 主成分: リグニンスルホン酸系化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	AE	AE 剤

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 博士(工学) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 博士(工学)

表-2 コンクリート配合とフレッシュ試験結果

配合条件		目標値		単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)		フレッシュ性状結果*		
W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W	C	S	G	AD	AE	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
50	47	12.0±1.5	4.5±0.3	165	330	834	981	1.00	0.001	10.5~13.5	4.2~4.6	21~23

*フレッシュ性状は、各水準における数値の変動(最小値~最大値)として記載

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を表-1に示す。セメントはβ-C₂Sを主成分とするCO₂吸収・硬化セメントを使用した。CO₂吸収・硬化セメントの密度およびブレン比表面積は、それぞれ、3.16g/cm³および3,300cm²/gであり、OPCと同等である。骨材は細骨材として山砂を、粗骨材として砂岩砕石2005を使用した。化学混和剤にはAE減水剤およびAE剤を使用した。

コンクリートの配合を表-2に示す。水セメント比は50%とし、単位水量は165kg/m³、細骨材率は47%とした。フレッシュコンクリートのスランブの目標値は12.0±1.5cmとし、空気量は炭酸化速度や強度への影響が懸念⁸⁾されるため目標値を4.5±0.3%とした。

2.2 コンクリートの作製方法

コンクリートの練混ぜは、20°C、R.H.80%以上に設定された恒温恒湿室で行い、ミキサにはパン形強制練ミキサ(公称容量55L)を使用した。1バッチ当たりの練混ぜ量は40Lとし、2バッチ合わせてコンクリートを作製した。コンクリートを作製する際は、1バッチ目の排出時にフレッシュ性状を確認し、目標値を満足している場合には、1バッチ目と同等の混和剤添加量にて2バッチ目の練混ぜを行った。練り混ぜたコンクリートは、練り船上で1バッチ目と2バッチ目の材料が概ね均質となるまで、十分に混合した。2バッチを混合したコンクリートは、フレッシュ性状が目標値を満足していることを確認し、供試体の成形を行った。

2.3 コンクリートの養生方法

本検討では、CO₂吸収・硬化セメントのコンクリート製品への適用を想定しているため、成型後の供試体は、蒸気養生を行った後に脱型し、所定の炭酸化養生を行った。蒸気養生の条件は、前置養生4時間の後、20°C/hrで昇温し、最高温度65°Cにて4時間保持した後、4.5°C/hrで降温し、蒸気養生槽内で材齢24時間になるまで静置した。炭酸化養生は、高濃度中性化促進装置(MARUI社製MIT-639-3-52)を使用し、表-3に示す条件で炭酸化養生を行った。また、表-3中のCO₂濃度0%(実際は、大気中濃度と同程度)の水準は、セメントの水和と炭酸化による力学特性への影響を分けて考察するために設定したものである。CO₂濃度0%の供試体の養生には、所定の温度および湿度に設定した恒温恒湿槽を用いた。炭酸

表-3 炭酸化養生条件

	温度 (°C)	20		30		45		60	
	相対湿度 (%)	60	40	60	80	60	40	60	60
CO ₂ 濃度 (%)	0 (大気)	○	○	○	○	○	○	○	○
	20	△	△	○	△	△	△	△	△
	50	△	△	○	△	△	△	△	△
	80	○	○	●	○	○	○	○	○

表-4 評価項目および試験方法

分類	評価項目	評価手法
フレッシュ性状	スランブ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108
炭酸化性状	中性化深さ	JIS A 1152

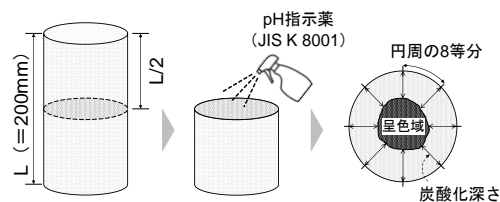


図-1 円柱供試体の中性化深さの測定

化養生条件は、茨木ら²⁾の研究における養生条件である温度30°C、湿度60%RH、CO₂濃度80%(表3中●の水準)を基準とし、温度20~60°C、湿度40~80%RHおよびCO₂濃度20~80%の範囲で設定した。これ以降、水準名を温度-湿度-CO₂濃度として記す(上記基準の場合:30-60-80)。炭酸化養生期間は、1, 3, 6および13日(材齢に換算しそれぞれ2, 4, 7および14日)を設定した。

2.4 評価項目および試験方法

表-4に評価項目および試験方法を示す。コンクリートのフレッシュ性状は、スランブ、空気量および温度を、コンクリートの力学特性として圧縮強度を、それぞれ試験規格に準拠し測定した。なお、コンクリート製品の種類や寸法などによって、炭酸化養生によるコンクリートの強度発現性が異なる可能性が考えられるが、本研究では、CO₂吸収・硬化セメントを使用したコンクリート自体の品質評価を対象とし、コンクリート製品工場などで一般的に行われているJIS A 1108に準拠した圧縮強度試験を行った。

炭酸化深さの測定は、供試体形状の違いによる炭酸化速度への影響を評価する目的で、10×10×40cmの角柱供

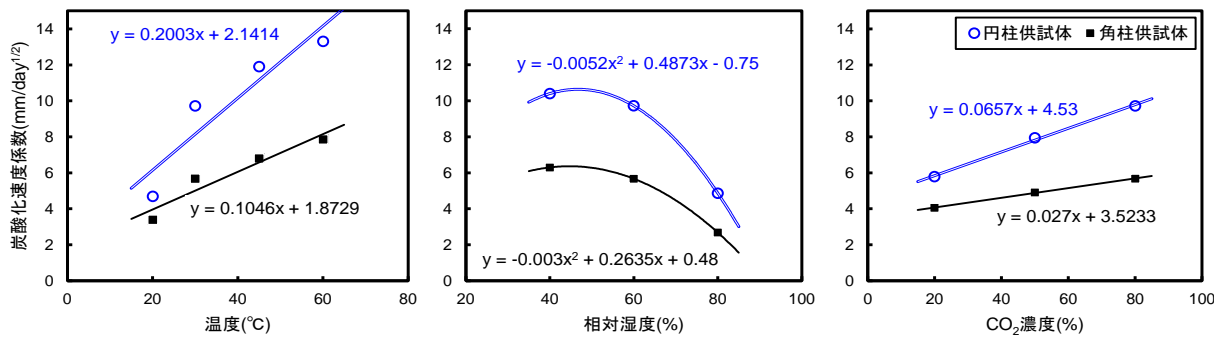


図-2 各炭酸化養生条件が炭酸化速度係数に与える影響

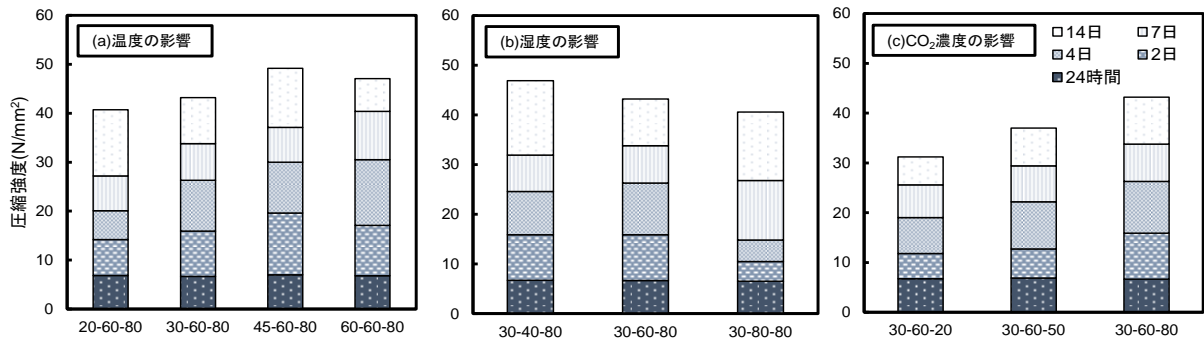


図-3 各炭酸化養生条件が圧縮強度に与える影響

試体とφ10×20cmの円柱供試体の2種類の供試体を用いて実施した。角柱供試体の測定は、JIS A 1152 に準拠して実施し、円柱供試体の測定は、高さの1/2の位置で湿式コンクリートカッターにより切断し、切断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して8か所で測定した平均値とした。図-1に測定方法を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートのフレッシュ性状

練上り直後におけるコンクリートのフレッシュ性状は表-2に示すとおりである。いずれの場合も、AE減水剤やAE剤の添加率を変化させることなく、スランプ10.5~13.5cm、空気量4.2~4.6%のフレッシュコンクリートが得られており、目標とするフレッシュ性状が確保できた。

3.2 炭酸化養生条件が炭酸化速度に与える影響

図-2に、温度、湿度およびCO₂濃度の各炭酸化養生条件と炭酸化速度係数の関係について示す。本検討では、実施した炭酸化養生条件の範囲で炭酸化深さが \sqrt{t} 則に従うものとして、既往の知見⁹⁾を参考に炭酸化速度係数を算出した。

(1) 温度の影響

図-2(a)に、湿度60%RH、CO₂濃度80%で一定とした場合の、温度と炭酸化速度係数の関係を示す。温度の上昇に伴い炭酸化速度係数が増加する傾向が認められた。特に、本研究における最高温度60℃を設定した60-60-80

の水準では、円柱供試体において中心部まで炭酸化が進行していることを確認した。温度と炭酸化速度との関係は、汎用的なコンクリートにおいても⁵⁾、炭酸化により硬化するセメント系材料においても⁶⁾、アレニウスの法則で整理できるとされているが、本研究では、図に示した直線関係にあるものと考えた。

(2) 湿度の影響

図-2(b)に、温度30℃、CO₂濃度80%で一定とした場合の湿度と炭酸化速度係数の関係を示す。湿度が40%~80%RHの範囲では、湿度が高いほど炭酸化速度係数が低下した。この際、湿度40%RHと60%RHの炭酸化速度係数の差はわずかであった一方で、80%RHの場合には著しく低下しており、高湿度の場合には炭酸化の進行が極めて遅いことが確認された。また、湿度と炭酸化速度係数の関係は、既往の研究³⁾を参考に、図のように二次関数で整理した。

(3) CO₂濃度の影響

図-2(c)に、温度30℃、湿度60%RHで一定とした場合のCO₂濃度と炭酸化速度係数の関係を示す。CO₂濃度の上昇に伴い炭酸化速度係数は大きくなる傾向を示し、その関係は、直線関係で整理できるものと考えた。

3.3 炭酸化養生条件が強度に与える影響

炭酸化養生を行っていない水準は、いずれの養生条件においても材齢の経過に伴って水和反応に起因すると考えられるわずかな強度増進が確認された。しかし、本研究の範囲では、温度や湿度の違いによる強度増進に差は

認められなかった。なお、炭酸化を行っていない水準の圧縮強度の平均値は、材齢 2 日で 9.28N/mm²、4 日で 11.2N/mm²、7 日で 11.9N/mm² および 14 日で 12.7N/mm² であった。一方で、炭酸化養生を施した水準では、養生条件の違いにより明確な強度発現性の違いが認められた。図-3 に温度・湿度・CO₂ 濃度の各条件と圧縮強度の関係について示す。

(1) 温度の影響

図-3(a)に、強度に与える温度の影響について示す。養生温度 20~45℃までの範囲では、温度の上昇に伴って圧縮強度が増加する傾向を示した。しかし、45-60-80 と 60-60-80 を比較すると、材齢 7 日までは温度 60℃において強度発現性が高くなったものの、材齢 14 日にはほぼ同等の圧縮強度であり、炭酸化速度係数と温度の関係とはやや異なる結果であった。

(2) 湿度の影響

図-3(b)に、強度に与える湿度の影響について示す。湿度の上昇に伴って圧縮強度は低下する傾向が認められた。また、この傾向は、80%RH の材齢 7 日までで顕著であった。なお、80%RH の場合、材齢 7 日から 14 日にかけての強度増進幅は最も大きかった。この結果から、湿度 80%RH の高湿度環境では、炭酸化養生開始前の供試体内部に保有されている水分の逸散が材齢初期に抑制され、供試体内部への CO₂ ガスの浸透が遅延したためと考えられた。

(3) CO₂ 濃度の影響

図-3(c)に、強度に与える CO₂ 濃度の影響について示す。CO₂ 濃度の上昇により圧縮強度が増加する傾向が認められた。この結果は、炭酸化速度係数の傾向と一致していた。

(4) 供試体寸法の影響

円柱供試体と角柱供試体の中性化深さの関係を図-4 に示す。円柱と角柱供試体の中性化深さは、直線関係にあり、角柱供試体と比較し円柱供試体で炭酸化深さが大きくなるのが分かる。また、両者の関係式からその増加率は、1.63 倍であることが分かった。今後、様々な形状のコンクリート製品を対象に CO₂ 吸収・硬化セメントを使用していくために、形状と炭酸化速度に関するより詳細な検討を行う予定である。

4. 炭酸化養生条件による各種物性値の予測

4.1 炭酸化の進行度が硬化特性に与える影響

炭酸化養生条件の違いにより、CO₂ 吸収・硬化セメントを使用したコンクリートの炭酸化深さや圧縮強度が大きく異なった。ここでは、炭酸化の進行度が硬化体の強度発現性に与える影響について整理した。3.3 節で述べたとおり、炭酸化の有無により強度発現性に

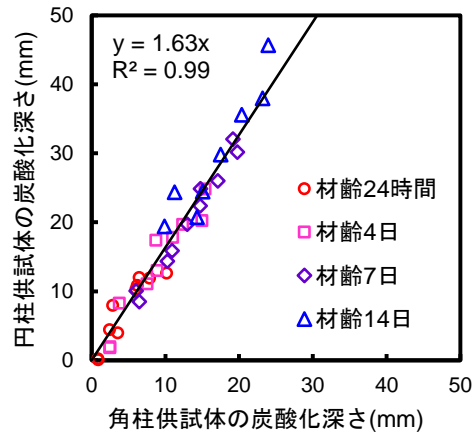


図-4 円柱供試体と角柱供試体の中性化深さの関係

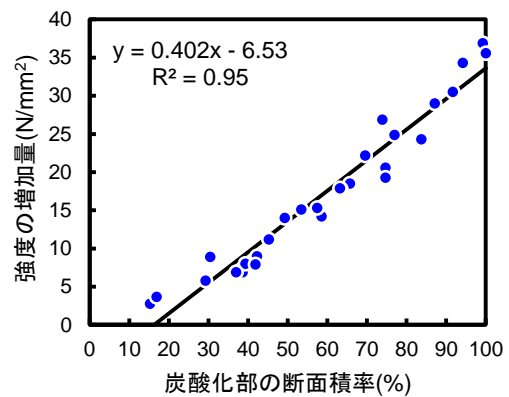
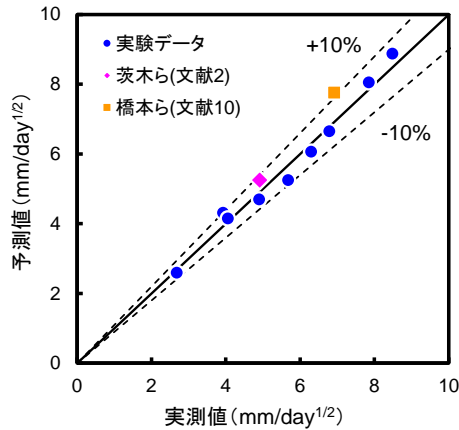


図-5 炭酸化断面積率と炭酸化による圧縮強度増加量の関係

大きな差が認められた。この圧縮強度の差は、セメントの水和による強度を差し引いた炭酸化に伴う強度増加量とみなすことができる。そのため、この差を炭酸化による強度増加量と定義した。また、炭酸化の進行度については、圧縮強度との関係性を整理するにあたり、炭酸化深さよりも炭酸化している面積が重要であると考えられたため、炭酸化養生後の円柱供試体の炭酸化深さから炭酸化部の断面積を算出し、断面中の炭酸化部の割合を炭酸化断面積率と定義した。表-5 に炭酸化断面積率の算出結果を示す。3.2 節および 3.3 節において、温度の上昇に伴い炭酸化深さが大きくなる一方で、圧縮強度は、45℃までは上昇するものの 60℃では 45℃の場合と同程度になることを述べた。ここで、養生温度 45℃と 60℃の炭酸化断面積率を確認すると、45-60-80 および 60-60-80 それぞれ 99% および 100% となっており、炭酸化している断面積はほぼ同等である。これは 3.3 節の圧縮強度の傾向と一致していた。炭酸化断面積率と炭酸化による圧縮強度増加量の関係を図-5 に示す。炭酸化断面積率と強度増加量の関係は、いずれの養生条件、材齢においても以下に示す関係式 (1) により表されることを確認した。

表一五 炭酸化断面積率

水準名	炭酸化断面積率(%)			
	2日	4日	7日	14日
20-60-80	29.2	30.4	53.4	73.9
30-40-80	38.6	58.5	74.7	94.2
30-60-20	15.2	39.4	49.3	65.7
30-60-50	16.8	45.2	63.4	83.7
30-60-80	36.9	57.4	69.5	91.7
30-80-80	0.24	7.73	31.1	73.6
45-60-80	42.2	63.2	76.9	99.2
60-60-80	41.8	74.6	87.1	100
60-40-80	44.1	64.5	84.3	100



図一六 炭酸化速度係数の予測値と実測値の関係

$$\Delta f'_c = \begin{cases} 0 & (0 \leq \varphi < 16.24) \\ 0.402\varphi - 6.53 & (16.24 \leq \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta f'_c$: 炭酸化による強度増加量 (N/mm²)、 φ : 炭酸化断面積率 (%) である。この結果から、CO₂ 吸収・硬化セメントを使用したコンクリートにおいて、炭酸化の進行度と強度発現性には密接な関係があり、断面積率が16%程度(炭酸化深さ4mm程度)までは、強度増進への影響は小さいことが分かった。以上の結果より、コンクリート製品で所定の強度を得るために効率的に炭酸化を進行させることの重要性が改めて確認された。

4.2 炭酸化養生条件が炭酸化速度に与える影響

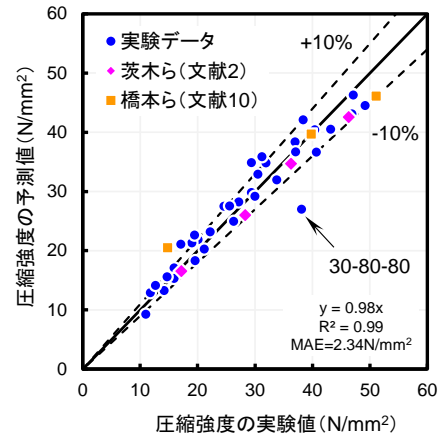
本研究で求めた温度、湿度およびCO₂濃度条件と炭酸化速度係数の実験値から、各条件の影響関数を算出し、炭酸化速度係数の定式化を試みた。炭酸化速度係数は角柱供試体の結果を使用した。各養生条件において、得られた炭酸化速度係数との関係から、以下の基本式(2)に基づいた非線形回帰により、養生条件と炭酸化速度係数の関係式を構築した。

$$A_i = f_1(T_i) + f_2(h_i) + f_3(g_i) + \varepsilon \quad (2)$$

ここで、 A_i : 炭酸化速度係数 (mm/day^{1/2})、 $f_n(x_i)$: 変

表一六 炭酸化速度係数と養生条件の関係式

関係式	記号	関係式
予測式	A_i	$A_i = f_1(T_i) + f_2(h_i) + f_3(g_i) + \varepsilon$
温度の関数	$f_1(T_i)$	$0.0936 \cdot T_i$
相対湿度の関数	$f_2(h_i)$	$-0.0023 \cdot h_i^2 + 0.1893 \cdot h_i$
CO ₂ 濃度の関数	$f_3(g_i)$	$0.0183 \cdot g_i$
残差	ε	-2.0996



図一七 圧縮強度の予測値と実測値の関係

数 x_i による影響関数、 T_i : 温度 (°C)、 h_i : 湿度 (%)、 g_i : CO₂濃度 (%)、 ε : 残差である。

非線形回帰により得られた関係式を表一六に、関係式より求めた炭酸化速度係数の予測値と実験値の関係を図一六に示す。関係式は $y=x$ の式に近似することが可能になり、高い相関性が認められた。

この予測式の妥当性を検証するため、茨木ら²⁾および橋本ら¹⁰⁾の結果よりW/C50%のデータを選定し、図一六中に記す。この際、上記の文献では $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体で中性化深さを求めているため、図一四で得られた関係を用いて、円柱供試体の実験値を角柱供試体の中性化速度係数に換算した。なお、茨木らの研究では、本研究の30-60-80と同じ炭酸化養生条件、橋本らは、本研究では実施していない温度50°C、湿度50%RH、CO₂濃度80%の条件で養生を行っている。これらの結果は、本研究で定めた予測値と実験値の関係性上にプロットされており、予測式の妥当性が確認された。

4.3 炭酸化養生したコンクリートの圧縮強度予測

前章までに得られた関係を用いて、温度20~60°C、湿度40~80%、CO₂濃度20~80%の範囲で炭酸化養生を行ったコンクリートの円柱供試体の圧縮強度について、以下の式(3)~(5)による予測を試みた。

$$f'_c = \Delta f'_c + f_{c0} + \Delta f_{cw} \quad (3)$$

$$\varphi_i = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{x_i}{r_0} \right)^2 \right\} \times 100 \quad (4)$$

$$x_i = \gamma \cdot A_i \sqrt{(t_i - t_0)} \quad (5)$$

ここで、 f_{c0} : 蒸気養生直後の圧縮強度 (N/mm²), Δf_{cW} : 水和進行に伴う圧縮強度の増加量 (N/mm²), x_i : 材齢 t_i における円柱供試体の炭酸化深さ (mm), r_0 : 円柱供試体の半径 (mm), γ : 円柱と角柱の炭酸化深さの比 (= 1.63), t_i : 材齢 (day), t_0 : 炭酸化開始材齢 (day) である。3.3 節で述べた通り、材齢 14 日までの初期材齢では、いずれの温・湿度環境で養生した場合も概ね同等であったことから、 $f_{c0} + \Delta f_{cW}$ で表される項については、炭酸化養生を行っていない水準における圧縮強度の平均値を用いることとした。提案式による圧縮強度の予測結果を図-7 に示す。なお、図中には、上述の茨木ら²⁾、橋本ら¹⁰⁾ による検討結果も併記した。コンクリート円柱供試体の圧縮強度は、30-80-80 を除いた水準において、いずれの材齢、炭酸化養生条件においても ±10% 程度の範囲で予測することができることを確認した。これらの結果より、提案式(1)~(5)を用いることで、種々の炭酸化養生を行ったコンクリート円柱供試体の圧縮強度が概ね予測可能となるが、一方で、30-80-80 のような、高湿度下で炭酸化養生を行った場合には、予測精度が低下する可能性が示唆された。

本研究では、炭酸化養生条件の影響に着目した検討を実施したため、同一配合のコンクリートのみを対象とし、また、炭酸化養生前の養生条件も同一とした。しかしながら、実際のコンクリート製品では、異なる配合や養生期間により、炭酸化養生前の強度が異なることで、本研究で定めた予測式が適応できないことも想定される。今後は、小林ら¹¹⁾ が述べている炭酸化養生前の積算温度や水セメント比など配合の影響や上述した製品形状なども考慮し、CO₂ 吸収・硬化セメントを使用したコンクリートの炭酸化速度や強度に与える因子を整理していく予定である。

5. まとめ

本研究では、CO₂ 吸収・硬化セメントを用いたコンクリートについて、炭酸化養生条件が異なる場合のコンクリートの炭酸化速度や硬化性状について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 炭酸化養生時の温度 20~60°C、湿度 40~80%RH および CO₂ 濃度 20~80% の範囲では、温度および CO₂ 濃度の上昇、湿度の低下に伴い圧縮強度および炭酸化深さは増加する傾向が認められた。
- (2) 炭酸化養生条件が炭酸化速度係数に与える影響を関係式で示し、炭酸化養生条件から炭酸化速度係数を予測する式を提案し、妥当性を確認した。
- (3) 炭酸化断面積率と炭酸化による圧縮強度増加量の関係は直線関係で示され、炭酸化した面積の増加によって強度が増加した。このことから炭酸化の

進行と強度発現性は、密接に関係していることが分かった。

- (4) 炭酸化速度係数の予測式と炭酸化断面積率と圧縮強度増加量の関係式を用いることで、概ね圧縮強度が予測できることを示した。

参考文献

- 1) 扇嘉史, 小林和揮, 橋本真幸, 細川佳史: CO₂ 吸収・硬化セメント「カーボフィクス®セメント」の強度発現および CO₂ 固定化, 太平洋セメント研究報告, 第 183 号, pp.43-54, 2022
- 2) 茨木泰介, 橋本真幸, 石田征男, 曾根涼太: β -C₂S を主要鉱物とした CO₂ 吸収・硬化セメント系材料を用いたコンクリートの力学特性および炭酸化性状, コンクリート工学年次論文集, 46 巻, 第 1 号, pp.271-276, 2024
- 3) 鄭載東, 平井和喜, 三橋博三: モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, 1 巻, 第 1 号, pp.85-94, 1990
- 4) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化に及ぼす温度の影響, 生産研究 研究速報, 45 巻, 第 8 号, pp.606-609, 1993
- 5) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会論文集, No.451, V-17, pp.119-128, 1992
- 6) 渡邊賢三, 横関康祐, 取違剛, 坂井悦郎: γ -2CaO·SiO₂ を添加したセメント系材料の各種炭酸化養生条件における物理・化学特性, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.3, pp.157-165, 2012
- 7) 小林和揮ほか: 低炭素型セメントを用いた炭酸化養生コンクリートの硬化性状と CO₂ 低減効果, 無機マテリアル学会第 143 回学術講演会講演要旨集, No.580, pp.58-59, 2021.11
- 8) 星野清一ほか: 石灰石微粉末を添加したモルタルの中性化速度に関する一考察, コンクリート工学論文集, 11 巻, 第 3 号, pp.111-119, 2000
- 9) 岸谷孝一, 西沢紀昭編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化, 技法堂出版, 第 1 版 (1), 1988
- 10) 橋本真幸ほか: CO₂ 硬化セメント系材料を用いた CO₂ 吸収コンクリートの基礎物性, 土木学会全国大会年次学術講演会, 79 巻, V-55, 2024
- 11) 小林聖, 横関康祐, 渡邊賢三, 取違剛: 供試体寸法および初期養生条件がコンクリートの炭酸化深さに与える影響, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-694, pp.1387-1388, 2010.9