

高濃度高圧の CO₂ 環境下におけるコンクリートの炭酸化進行の予測モデル

藤倉 裕介

概 要

本研究では、高圧かつ高濃度の CO₂ 環境下における普通コンクリートの炭酸化進行の評価方法を構築する目的で、Fick の拡散式に基づく炭酸化進行の予測モデルを提案した。モデルの検証のため、コンクリートの配合や炭酸化開始材齢が異なる試験体を作製し、CO₂ 濃度100%、0.5 MPa 及び 1.0 MPa の圧力下で促進炭酸化試験を行った。炭酸化試験の期間と炭酸化深さ、炭酸化速度や炭酸化に伴う質量変化の実験結果について、モデルにより算定した結果と比較した。その結果、モデルにより算定した炭酸化速度係数や質量変化率は実験値とおおよそ一致し、本モデルにより炭酸化進行の評価が可能であることを確認した。また、炭酸化の進行に伴って、速度係数が減少していることも分かり、モデルの精度向上には、更なる炭酸化機構の解明が必要であることも分かった。

Carbonation Model of Hardened Ordinary Concrete Subject to High-pressure CO₂ Environment

Abstract

In this study, modeling based on Fick's laws of diffusion, hydration reaction formula, and carbonation reaction formula was conducted to determine the progress of carbonation of hardened concrete and to estimate the coefficient of carbonation rate and the mass change rate, by using concentrated CO₂ under a high-pressure CO₂ environment. For comparison of this model, hardened ordinary concrete with different compressive strength, mix proportions, and curing age was subjected to concentrated CO₂ gas under a pressure of 0.5 MPa and 1.0 MPa respectively, using a high-pressure injection chamber, and evaluated for the carbonation depth, coefficient of carbonation rate, and mass change rate for immobilization of CO₂ by concrete. As a result, it was found that the coefficient of carbonation rate and the mass change rate calculated by the model was roughly in good agreement with the experimental results, and the carbonation progress can be estimated using the proposed model. In addition, the actual test results suggest that the degree of carbonation and coefficient of carbonation rate may decrease as carbonation progresses, and it is necessary to further study the mechanism of the progress of carbonation under a high-pressure CO₂ environment.

キーワード：二酸化炭素 (CO₂)、Fick 則、炭酸化反応式、水和反応式、炭酸化速度、質量変化率

§1. はじめに

地球温暖化対策の一つとして二酸化炭素 (CO₂) を資源として捉え、これを分離、回収し、CO₂ を燃料や原料として利用するカーボンリサイクル技術が多数検討されている。経済産業省で取りまとめられた「カーボンリサイクル技術ロードマップ (2021年6月に改訂)」¹⁾ では、CO₂ から製造される製品としてコンクリート製品や構造物に関連したCO₂の固定化と再利用の技術が言及されている。また、ICEF (Innovation for Cool Earth Forum) の「CARBON MINERALIZATION ROADMAP」²⁾ では、コンクリートや骨材へのCO₂固定化を含む「炭素鉱物化」が気候変動対策に重要な役割を果たす技術の一つとして位置づけられている。更に、2021年10月に経済産業省で取りまとめられた「グリーンイノベーション基金事業/CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画³⁾ では、コンクリートにおけるCO₂削減だけでなくCO₂固定化の具体的な数値目標が定められ、普通コンクリートにおけるCO₂排出量を実質ゼロにすることが目標として掲げられている。これまでのような各種混和材をセメント置換することによってセメント製造由来のCO₂排出量を削減する方法だけでなく、発電所や化学プラント等から回収されたCO₂をコンクリート製造やコンクリート施工現場で利活用し、コンクリートに固定化する技術やその評価方法の確立が重要となる。

コンクリート中の水和生成物とCO₂との化学反応(炭酸化反応)における標準生成エンタルピー (Gibbsのポテンシャル) は負であり、熱力学的には全ての水和生成物は自発的に炭酸化反応する⁴⁾。そのため、膨大なエネルギーやコストを要しなくても水和生成物とCO₂との炭酸化反応が進行しCO₂を安定的にコンクリート内部に固体として固定化できる点は大きなメリットである。しかしながら、コンクリート製品や構造物に短期間で多量のCO₂を積極的に固定化しようとすると、その合理的な手段を検討することが必要となる。

コンクリートへのCO₂の利活用については、プレキャスト製品やコンクリートブロックの蒸気養生やオートクレーブ養生の際のエネルギー削減を目的として、高圧下で促進炭酸化する養生方法が検討され^{5,6)}、最近ではCO₂の利活用の観点から注目されている^{7,8)}。また、生コンクリートへCO₂を直接注入する方法⁹⁾や現場で養生室を設けて促進炭酸化する方法¹⁰⁾なども検討されている。しかしながら、これら既往の方法では、練混ぜ時から脱型直後の若材齢コンクリートの養生を目的とした研究例が多く、硬化したコンクリート部材全体に積極

的にCO₂を固定化する手法を検討した例は少ない。

一方で、コンクリートの炭酸化反応に伴って内部では炭酸化反応熱^{6,11)}が生じるとともに細孔溶液中のpH低下^{4,12)}、細孔の緻密化^{4,12)}やC-S-Hの分解によるCa/Si比の低下¹²⁾などが生じる。また、マクロな物性の変化としては体積収縮¹³⁾、質量増加^{13~15)}や圧縮強度の増加⁴⁾などがある。これらコンクリートの炭酸化に伴う物性変化や現象の把握は反応メカニズムの解明に寄与するだけでなく、炭酸化深さの把握やCO₂固定化量を非破壊で評価、または数理モデルで予測する上での重要な情報となる。

以上のような背景から、著者らは合理的にコンクリート製品や構造物へCO₂を固体として固定化する方法を確立することを目的としてCarbon Capture Concrete (CCC)[®]の開発を行っており¹⁶⁾、部材の中央部に長孔や多孔型のパイプやホースをあらかじめ設け、高圧かつ高濃度でCO₂を注入してコンクリートを炭酸化させることで、コンクリート部材全体に数時間から1日未満という短期間で多量のCO₂をコンクリートに固定化できることを明らかにした。また、かぶり部分や鉄筋腐食の影響範囲を避けた部材断面内の任意の箇所にCO₂を固定化することを想定し、その設計手法の確立に役立つ炭酸化速度係数¹⁷⁾や質量変化¹⁸⁾の推定手法の検討を行っている。本報告では、炭酸化進行の予測モデルを提案するとともに、実験結果との比較によりモデルの適用性について検証した。

§2. 炭酸化進行の基本モデル

高圧かつ高濃度CO₂環境下における炭酸化深さの進行を推定できるモデルを確立する目的で、Fickの拡散式を用いた推定式を以下に示す。炭酸化進行については多くのモデルが提案されているが^{例えは19~21)}、高濃度かつ高圧下のCO₂環境下での炭酸化反応を推定するモデルは少ない。コンクリートの炭酸化現象が拡散律速となるものと仮定すると炭酸化フロントは式[1]の関係(Fickの第1式)が成り立つ⁴⁾。

$$dm = m_0 \cdot F \cdot dy = \frac{D' \cdot F \cdot C_s}{y} \cdot dt \quad [1]$$

ここに、 dm : 時間 dt 間に試験体表面から拡散するCO₂量で $dm = m_0 \cdot F \cdot dy$ (kg/m³)、 m_0 : コンクリート単位体積当りに吸着されるCO₂質量 (kg/m³)、 F : CO₂が拡散する試験体の表面積 (m²)、 y : 炭酸化コンクリート層の厚さ (m)、 D' : コンクリート中のCO₂の有効拡散係数 (m²/s)、 C_s : コンクリート表面におけるCO₂濃度 (kg/m³)、 t は経過時間である。式[1]を積分すると式[2]が得られる。

$$\frac{y^2}{2} = \frac{D' \cdot C_s}{m_0} \cdot t \quad [2]$$

ここで、気体に占める CO₂ のモル数 n (mol) = W_{CO_2} (kg) / M_{CO_2} (kg/mol) $\times \alpha_{CO_2}$ (m³/m³)、コンクリート表面における CO₂ 濃度 C_s (kg/m³) = W_{CO_2} (kg) / V (m³) で表す。ここで、 W_{CO_2} (kg) は CO₂ の質量、 M_{CO_2} (kg/mol) は CO₂ の物質量、 α_{CO_2} (m³/m³) は気体中の CO₂ の占める割合、 V (m³) は体積である。これらを理想気体の状態方程式 ($PV = nRT$) に代入して整理すると、 $C_s = M_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2} \times P / RT$ が得られる。 P_{CO_2} (Pa) は、圧力、 T (K) は温度、 R (J/K/mol) は気体定数である。以上より、式[2]に代入して整理すると式[3]が得られる。また、 k を式[4]のようにおく。

$$y = \sqrt{\frac{2D' \cdot P \cdot M_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2}}{m_0 \cdot R \cdot T}} \cdot t \quad [3]$$

$$k = \sqrt{\frac{2D' \cdot P \cdot M_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2}}{m_0 \cdot R \cdot T}} \quad [4]$$

k (m/√s) は各コンクリートに対する炭酸化フロント進行を示し、炭酸化速度の特性値を示す係数 (炭酸化速度係数) を示す。以上をまとめると炭酸化進行の基本となる式[5]が得られる。

$$y = k\sqrt{t} \quad [5]$$

次項に、モデルの算定条件に必要な設定値であるコンクリート単位体積当りに吸着される CO₂ 質量 (水和物の炭酸化に必要な CO₂ の質量) m_0 (mol/m³)、コンクリート中の CO₂ の有効拡散係数 D' (m²/s) について示す。なお、炭酸化進行に伴って炭酸化速度係数が低下することが指摘されており、炭酸化速度係数の減少については、式[6]に示すような低減係数を考慮することが提案されている^{20,22)}。

$$k(t) = k \cdot t^n \quad [6]$$

ここで、 $k(t)$ は炭酸化期間 t における炭酸化速度係数、 k は式[4]で示される炭酸化速度係数 n は -0.2 ~ 0 の範囲の値の係数である。本モデルでは既往の研究²¹⁾でも提案されている $n = -0.2$ を与え炭酸化速度係数を試算する。

§3. 本モデルの算定条件

3.1 セメントの水和反応式と水和生成物量の算定

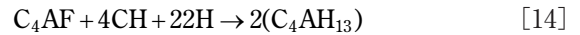
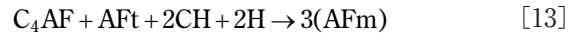
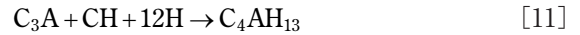
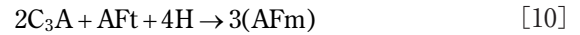
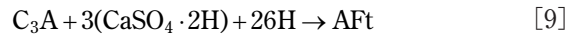
本モデルでは、炭酸化試験を開始する任意の材齢における水和生成物量を求め、それらが炭酸化反応して炭酸カルシウムが生成されるものと仮定して炭酸化進行や吸着される CO₂ 質量を算定する。セメントの水和

反応式は研究者により採用する式が異なっているが、以下を仮定する²³⁾。C₃S と C₂S の水和反応式は、式[7]および式[8]で表される。



ここで、 $3CaO \cdot SiO_2 = C_3S$ 、 $2CaO \cdot SiO_2 = C_2S$ 、 $H_2O = H$ 、 $CaO - SiO_2 - H_2O = CSH$ 、 $Ca(OH)_2 = CH$ である。本研究では、式[7]および式[8]における m は 1.75、 n は 4.0 とした²³⁾。

C₃A と C₄AF については、セッコウの存在下では AFt (エトリングサイト) を生成し、その後に AFm (モノサルフェート水和物) を生成、AFt の転化後は残りの C₃A と C₄AF は C₄AH₁₃ (アルミン酸カルシウム水和物) が生成する反応とした。水和反応式を式[9]~式[14]で示す。



ここで、 $3CaO \cdot Al_2O_3 = C_3A$ 、 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 = C_4AF$ 、各水和物については C₃A の反応では $x=1$ 、C₄AF の反応では $x=0.5$ とし、 $3CaO \cdot [x Al_2O_3 \cdot (1-x) Fe_2O_3] \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O = AFt$ 、 $3CaO \cdot [x Al_2O_3 \cdot (1-x) Fe_2O_3] \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O = AFm$ 、 $3CaO \cdot [x Al_2O_3 \cdot (1-x) Fe_2O_3] \cdot Ca(OH)_2 \cdot 12H_2O = C_4AH_{13}$ である。フェライト相については、Fe₂O₃ を一部固溶した水和物となるが、本研究ではアルミネート相と同様の反応、同様の水和物を生成するものと仮定した。

セメント鉱物の各材齢における水和反応率については、Table 1²³⁾ に示す値を仮定し、算定に用いた各物質の物理量を Table 2²³⁾ に示す。以上のような仮定により炭酸化開始材齢における水和生成物量 (kg/m³) を算定した。

また、二酸化炭素の拡散係数を定義する際に用いる空隙率は、コンクリート中のセメントペーストの空隙が該当するものとし、Fig. 1 に示すように水和収縮と未反応の水の体積の和として扱い、この空隙を練り混ぜ時の水とセメントの体積で除した値を材齢 t における空隙率 $\varepsilon(t)$ (ml/ml) とした。Fig. 1 に示すように、空隙の体積を $V_p(t)$ とし、単位質量あたりの練り混ぜ時のセメントペーストの体積 V_0 (ml/g) とすると、空隙率は式[15]で示され、 V_0 (ml/g) は水セメント比 (W/C) を w_0 とし、セメント密度を ρ_c (ml/g) とおくと、式[16]で示される。

Table 1 Hydration rate of clinker minerals

Minerals	Hydration rate (%)				
	1 day	3 days	7 days	28 days	91 days
C ₃ S	49	63	74	83	89
C ₂ S	10	18	27	45	72
C ₃ A	56	75	80	87	92
C ₄ AF	25	39	47	56	69

Table 2 Physical quantities of substances used for calculation

Minerals	Mollar volume (cm ³ /mol)	Molecular weight (g/mol)	Density (g/cm ³)
C ₃ S	72.0284	228.33	3.17
C ₂ S	52.5152	172.25	3.28
C ₃ A	89.1749	270.2	3.03
C ₄ AF	130.29	485.98	3.73
Gypsum dihydrate	74.2155	172.18	2.32
Water	18.02	18.02	1.00
C-S-H	121.216	230.31	1.90
CH	33.08	74.1	2.24
AFt	713.2159	1255.26	1.76
AFm	319.272	622.58	1.95
C ₄ AH ₁₃	277.495	560.54	2.02
CaCO ₃	—	100.087	2.71

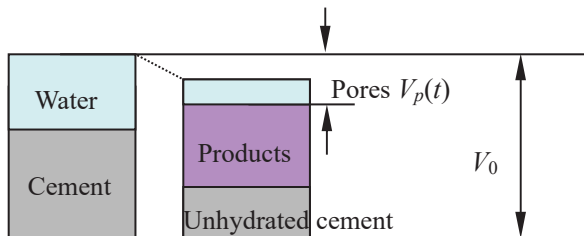


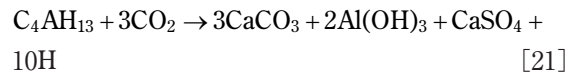
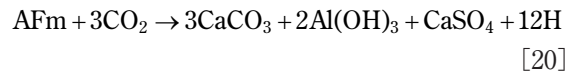
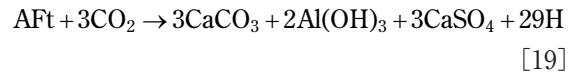
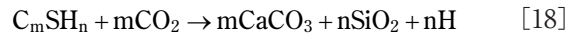
Fig. 1 Concept of pore volume at age t

$$\varepsilon(t) = V_p(t) / V_0 \quad [15]$$

$$V_0 = \frac{1 + \rho_c \cdot w_0}{\rho_c (1 + w_0)} \quad [16]$$

3.2 炭酸化反応式と炭酸化に伴う質量変化

炭酸化開始材齢 t における水和生成物の炭酸化反応式を以下のように仮定し、炭酸化に必要な CO₂ 量や炭酸化に伴う質量変化を算定する。各水和生成物の炭酸化反応式は式[17]～式[21]で表される。



以上より、炭酸化開始時の材齢 t における水和生成物量を求め、それらが炭酸化する際の CO₂ 量を求めることでコンクリート単位体積当りに吸着される CO₂ 質量 m_0 (mol/m³) を算定した。また、炭酸化試験による質量変化については、(炭酸化による生成物量) - (炭酸化前の水和物生成量) として求められるものと仮定し、コンクリートの単位セメント量やコンクリートの単位容積質量を用いて、炭酸化による質量変化率 (%) を算定する。炭酸化期間が短く、コンクリート試験体全体が炭酸化していない場合は、炭酸化部分の試験体の割合を考慮して炭酸化による質量変化率 (増加率) を算定した。

3.3 コンクリート中の CO₂ の有効拡散係数

硬化コンクリートにおける CO₂ の有効拡散係数 D' については空隙率と相対湿度に基づいて算定できる Papadakis らの提案式²⁴⁾ により与える。CO₂ の有効拡散係数は、CO₂ 濃度、圧力に依存するとともに、炭酸化により変化する細孔構造、更にそれにより変化する細孔内の相対湿度や pH によっても変化するものと考えられるが、ここでは炭酸化進行中において一定値として仮定して与えるものとする。Papadakis ら²⁴⁾ は、調湿したセメントペーストおよびモルタル供試体を用いて、拡散セル法により窒素の拡散係数を測定し、分子量の比の平方根により二酸化炭素の拡散係数を求めている。また、配合と水和率および水和物の密度を用いて空隙率を求め、二酸化炭素の拡散係数との関係を示し、式[22]を定式化している。

$$De = 1.64 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^{1.8} (1 - RH / 100)^{2.2} \quad [22]$$

ここで、 De : 二酸化炭素の有効拡散係数 (m²/sec)、 ε : 全空隙率、 RH : 相対湿度 (%) である。全空隙率 ε は、式[15]で求められる炭酸化試験を開始する材齢 t における空隙率 $\varepsilon(t)$ を与えた。また、相対湿度は炭酸化試験前のコンクリート試験体の養生条件である相対湿度である50%とした。

Table 3 Mix proportions of concrete

Fc (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						Slump (cm)	Air (%)
			W	C	S1	S2	G	AD		
18	64.8	49.6	184	284	446	438	936	2.84	15.5	4.1
21	60.0	49.1	184	307	438	427	936	3.07	16.5	3.7
24	57.9	48.8	184	318	433	422	936	3.18	16.0	5.5
27	54.9	48.4	184	336	425	417	936	3.36	15.5	4.1

Table 4 Materials

Material	Mark	Product Name	Density (g/cm ³)
Cement	C	Ordinary Portland cement	3.16
Water	W	Groundwater	1.00
Fine aggregate	S1	Crushed sand (under 5 mm) (Shirakawa-city)	2.64
	S2	Crushed sand (under 5 mm) (Sukagawa-city)	2.59
Coarse aggregate	G	Crushed stone (Iwaki-city)	2.73
Additives	AD	AE water reducing agent (Standard Type I)	-

Table 5 Mineral compositions of cement²³⁾

Cement	Mineral content (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄
Ordinary Portland cement	58.5	16.4	8.9	8.5	5.0

§ 4. 本モデルの検証

4.1 検証実験の概要

(1) 使用材料及びコンクリートの配合

試験体の作製には JIS に規定された市販のレディーミクストコンクリートを使用した。コンクリートの配合を Table 3 に示し、使用材料を Table 4 に示す。コンクリートは呼び強度 18、21、24、27 の 4 種類とし、スランプは 18 cm、粗骨材の最大寸法は 20 mm とした。Table 3 にはスランプと空気量の試験体作製時の実測値を示す。また、普通ポルトランドセメントの鉱物組成は、Table 5 に示すように著者らが JIS R 5202 (ポルトランドセメントの化学分析方法) に準じて求めた化学分析の結果をもとに算定した値²³⁾ を仮定した。

(2) 炭酸化試験の概要

炭酸化試験の試験体は、100 mm × 100 mm × 400 mm の角柱とし、鋼製型枠を使用して作製した。コンクリート打設後、翌日に脱型し所定の材齢まで 20℃ 水中養生を行い、以下に示す炭酸化試験を実施した。試験

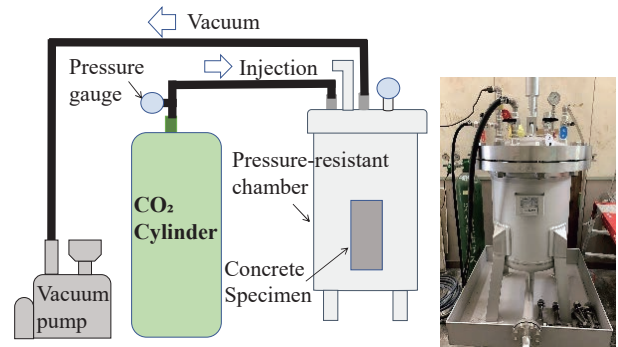


Fig. 2 Overview of carbonation test set-up

Table 6 Test conditions

Fc (N/mm ²)	Age (Days)	CO ₂ pressure (MPa)	Carbonation period (h)
18, 24	1, 3, 28, 91	0.5	24
18, 21, 24, 27	91	0.5, 1.0	3, 6, 9, 24

装置および試験方法の概略を Fig. 2 に示す。試験は金属製の耐圧容器を用い、その中にコンクリート試験体を設置して炭酸化試験を実施した。試験体を設置して耐圧容器を密閉し、容器内部を CO₂ で満たすための前処理として真空ポンプを用いて脱気した。その後、濃度 100% の CO₂ ガスを注入して炭酸化試験を実施した。試験条件は事前の脱気時間を 6 h (真空度 55 Pa) とし、CO₂ ガスを 0.5 MPa または 1.0 MPa の圧力で注入するケースとした。CO₂ の注入時間 (炭酸化反応の時間) を 3 h (時間)、6 h、9 h、24 h で試験を終了し耐圧容器内の試験体を取り出し、炭酸化試験後の試験体の質量を測定し、炭酸化試験による質量変化率を測定した。その後、試験体断面を湿式のコンクリートカッターで切断し、切断面に付着したのろを洗い流して乾燥させた後、フェノールフタレイン溶液を噴霧して赤色に呈色しない部分を炭酸化深さとしてノギスで測定した。炭酸化深さは、試験体外側から進行する部分の 8 か所を測定して平均値を算定した。炭酸化深さと炭酸化時間から炭酸化速度係数 k を算定した。耐圧容器を用いた炭酸化試験の条件、対象コンクリートや炭酸化開始材齢などの試験条件を Table 6 に示す。

4.2 モデルによる算定結果と実験結果の比較

Fig. 3 は炭酸化試験で得られた質量変化率と炭酸化深さの関係を呼び強度と圧力ごとにプロットして示す。Fig. 3 中には呼び強度が18及び27のケースにおける本モデルを仮定した場合の理論線を示す。多くの実験結果が理論線の範囲内に分布することが分かる。Fig. 4 は炭酸化による質量変化について、モデルによる算定結果と試験結果との比較を、呼び強度およびCO₂の圧力ごとにプロットを分けて示したものである。この図より、モデルによる算定結果と実験による測定結果はおおよそ一致した傾向が示されることが分かる。Fig. 5 には炭酸化速度係数の算定値と試験結果との比較を、呼び強度およびCO₂の圧力ごとにプロットを分けて示したものである。今回、式[6]における係数 n を -0.2 と仮定して算定したが、算定結果と実験結果が良好に一致した傾向が示されており、炭酸化進行に伴う低減係数を考慮する必要があることが分かる。今後、係数 n の物理的意味や低減のメカニズムについても明確にすることが課題である。一方、本研究では材齢に依存した水和生成物量を計算し、生成された水和物が完全に炭酸化するという仮定に基づいたモデルを提案したが、炭酸化機構や炭酸化による反応物量はCO₂濃度や圧力、温度などに大きく依存すること^{19,25)}、実環境と促進環境ではメカニズムが異なること²⁶⁾が報告されており、モデルの精度向上には炭酸化機構の更なる解明が必要である。

§5. まとめ

本研究では、高圧かつ高濃度のCO₂環境下における普通コンクリートの炭酸化進行の評価方法や予測モデルを構築する目的で、Fickの拡散式に基づき、セメントの水和反応式による水和生成物量とその炭酸化反応式を考慮した炭酸化速度係数や炭酸化による質量変化の予測モデル化を行った。モデルの検証のため、コンクリートの配合や炭酸化開始材齢が異なる試験体を作製し、CO₂濃度100%、0.5 MPa及び1.0 MPaの圧力下で促進炭酸化試験を行った。炭酸化試験の期間と炭酸化深さ、炭酸化速度や炭酸化に伴う質量変化の試験結果について、モデルにより算定した結果と比較し、本モデルにより炭酸化進行の評価が可能であることを確認した。一方で、実際の試験結果としては、炭酸化の進行に伴って炭酸化度や炭酸化速度係数が減少している可能性が考えられ、炭酸化進行のメカニズムを更に解明することが必要であることも分かった。

参考文献

- 1) 経済産業省：カーボンリサイクル技術ロードマップ

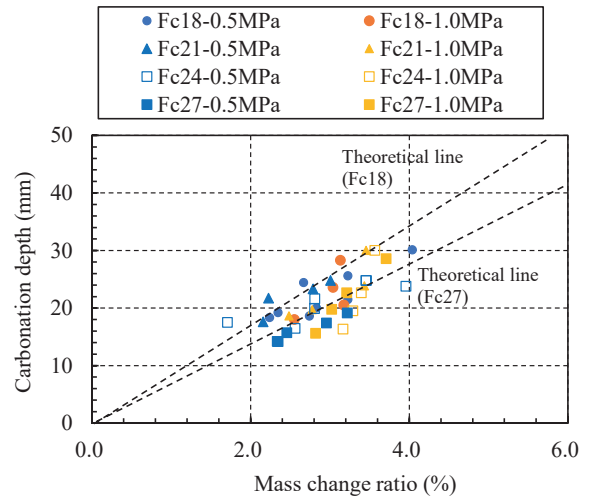


Fig. 3 Relationship between mass change ratio and carbonation depth (Measured)

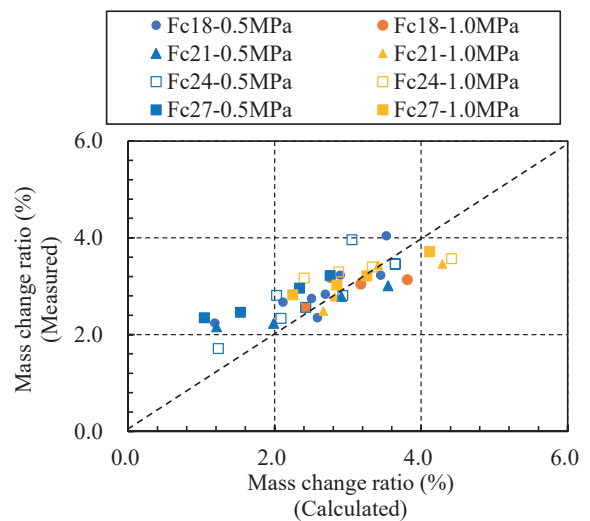


Fig. 4 Comparison of calculated and measured mass change ratio after carbonation

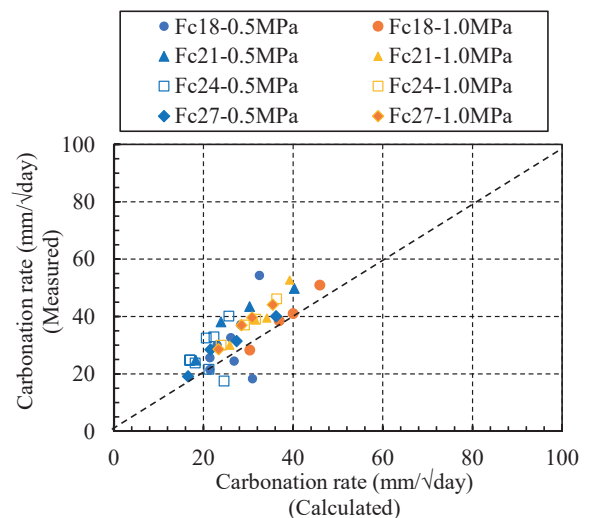


Fig. 5 Comparison of calculation using reduction factor n and measured carbonation rate

- (2019) <https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.pdf>
- 2) Innovation for Cool Earth Forum: CARBON MINERALIZATION ROADMAP (2021) https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2021_roadmap.pdf
 - 3) 経済産業省：グリーンイノベーション基金事業「CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画 (2021) <https://www.nedo.go.jp/content/100938441.pdf>
 - 4) Jochen Stark & Bernd Wicht (訳者：太田利隆ほか)：コンクリートの耐久性、社団法人セメント協会、pp. 45-50 (2003)
 - 5) J. F. Young et al.: Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂, Journal of American Ceramic Society, 57, pp. 394-397 (1974)
 - 6) C. J. Goodbrake et al.: Reaction of beta-dicalcium silicate and tricalcium silicate with carbon dioxide and water vapor, Journal of American Ceramic Society, 62, pp. 168-171 (1979)
 - 7) V. Rostami et al.: Carbonation Curing versus Steam Curing for Precast Concrete Production, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.24, Issue 9, pp. 1221-1229 (2012)
 - 8) C. Shi et al.: Accelerated carbonation as a fast curing technology for concrete blocks, Sustainable and Non-conventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites, pp. 313-341 (2017)
 - 9) S. Monkman et al.: Properties and durability of concrete produced using CO₂ as an accelerating admixture, Cement and Concrete Composites, Vol.74, pp. 218-224 (2016)
 - 10) 小林聖ほか：コンクリートの現場炭酸化養生に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 42、No. 1、pp. 1348-1353 (2020)
 - 11) Z. Li, Z. He, and Y. Shao: Early age carbonation heat and products of tricalcium silicate paste subject to carbon dioxide curing, Materials, Vol. 11, p. 730 (2018)
 - 12) (社)日本コンクリート工学協会：炭酸化研究委員会報告書、コンクリートの炭酸化に関する研究の現状 (1993)
 - 13) 中田清史、野口貴文：セメント硬化体の炭酸化過程における体積変化に関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol. 40、No. 1、pp. 459-464 (2018)
 - 14) 中村則清、若林和義：促進中性化試験におけるコンクリートの質量変化と中性化深さの関係、建材試験情報、Vol. 49、No. 7、pp. 8-13 (2013)
 - 15) V. Rostami et al.: Microstructure of Cement Paste Subject to Early Carbonation Curing, Cement and Concrete Research, 42(1), pp. 186-193 (2012)
 - 16) 藤倉裕介、藤沼智洋：高圧注入試験装置による硬化コンクリートのCO₂固定化手法の検討、フジタ技術研究報告、第58号、pp. 13-18 (2022)
 - 17) 藤倉裕介ほか：高圧注入試験装置による硬化コンクリートの炭酸化速度の検討、セメント・コンクリート論文集、Vol. 76、pp. 307-314 (2022)
 - 18) Sanjay Pareek ほか：高圧注入装置による硬化コンクリートの炭酸化進行に伴う質量変化、セメント・コンクリート論文集、Vol. 76、pp. 299-306 (2022)
 - 19) N. Hyvert et al.: Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation, Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 1582-1589 (2010)
 - 20) V. G. Papadakis et al. : Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation, ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 4, pp. 363-373 (1991)
 - 21) S. Kashef-Haghighi et al.: Mathematical Modeling of CO₂ Uptake by Concrete During Accelerated Carbonation Curing. Cement and Concrete Research, Vol. 67, pp. 1-10 (2015)
 - 22) Q. Qiu: A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques, Construction and Building Materials, Vol. 247, 118503 (2020)
 - 23) Y. Fujikura and H. Oshita: Pore Structure Model of Hydrates Comprising Various Cements and SCMs Based on Changes in Particle Size of Constituent Phases, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 133-147 (2011)
 - 24) V. G. Papadakis et al.: Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 2, pp. 186-196 (1991)
 - 25) M. Castellote et al.: Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations, Materials and Structures Vol. 42, pp. 515-525 (2009)
 - 26) 伊代田岳史ほか：セメント硬化体の炭酸化機構の検討—実環境と促進環境の相違について—、セメント・コンクリート論文集、Vol.72、pp. 225-232 (2020)

ひとこと

脱炭素社会への実現に向けて、混和材料の利活用によるコンクリートのCO₂削減技術だけでなく、CO₂固定化技術（炭素鉱物化）の開発が益々重要になるものと考えます。



藤倉 裕介