

実工場で製造した即脱式コンクリート製品の CO₂ 固定化方法に関する検討

藤倉 裕介

概 要

本研究では、実際の工場で製造される即脱式コンクリート製品を対象とし、CO₂を効率的に固定化する手法の構築を目的として実験的検討を行った。具体的には、3種類の即脱式コンクリート製品に対して高圧注入試験装置を用い、高濃度かつ高圧のCO₂を注入し、炭酸化反応に伴う質量変化、圧縮強度への影響、炭酸カルシウム生成率およびCO₂固定化量を評価した。その結果、炭酸化開始材齢を3日および6日とし、あらかじめ水和反応を一定程度進行させることで、炭酸化反応による質量増加率および圧縮強度が増加することが確認された。また、炭酸化養生による質量増加率とCO₂固定化量との間には線形関係が認められ、質量増加率を指標としたCO₂固定化量の評価が可能であることが示唆された。さらに、コンクリート製品工場における炭酸化養生槽の導入を想定し、実大規模の養生槽を用いてインターロッキングブロック製造時のパレット上での積層状態を再現した実験を実施した。その結果、製品が積層された状態においても、高圧かつ高濃度のCO₂を注入することで、積層位置に依存せず炭酸化反応が進行し、CO₂が固定化されることが確認された。

Experimental Study on CO₂ Sequestration Methods for Dry-cast Concrete Products Manufactured in Actual Factories

Abstract

In this study, experimental investigations were conducted to develop an effective method for CO₂ sequestration using dry-cast concrete products manufactured in commercial plants. Specifically, three types of dry-cast concrete products were subjected to high-concentration CO₂ injection under high pressure. The effects of carbonation were evaluated in terms of mass change, compressive strength, calcium carbonate formation, and CO₂ sequestration capacity. As a result, it was confirmed that both the mass increase due to the carbonation reaction and the compressive strength could be maximised by initiating carbonation at material ages of 3 and 6 days, when the hydration reaction was already progressing. Furthermore, a linear relationship was observed between the mass increase due to carbonation curing and the amount of CO₂ sequestered, suggesting that the CO₂ sequestration capacity can be evaluated from mass increase alone. A large-scale curing chamber was used to simulate the palletised stacking conditions that occur during the production of interlocking blocks in commercial plants. The results demonstrated that, even under stacked conditions, the carbonation reaction progressed uniformly regardless of the stacking position when high-concentration, high-pressure CO₂ was injected, resulting in overall mass increase and effective CO₂ sequestration throughout the products.

キーワード：即脱式コンクリート製品、炭酸化反応、炭酸化養生、CO₂固定化、圧縮強度、質量増加率

§1. はじめに

近年、世界的な課題となっている地球温暖化の対策の一つとして、二酸化炭素（以下、CO₂）を資源として捉え、分離・回収し、再利用するCarbon dioxide Capture and Utilization (CCU) 技術の適用が進められている。このCCUにはドライアイスや溶接などCO₂を直接利用する方法と、化学品や薬品の原料として利用するカーボンリサイクル技術がある。コンクリートへのCO₂の利活用と固定化もカーボンリサイクル技術に分類されている。2019年6月に経済産業省によって取りまとめられた「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、化学品、ポリマー、燃料、鉱物などが挙げられている。中でもコンクリート製品や構造物に関連したCO₂の固定化や再利用の技術はCO₂を燃料や原料に変換するエネルギーが不要というメリットがあるため注目されている。また、ICEF (Innovation for Cool Earth Forum) の「CARBON DIOXIDE UTILIZATION (CO₂U) —ICEF ROADMAP 1.0」²⁾ や「CARBON MINERALIZATION ROADMAP」³⁾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。コンクリートへのCO₂の利活用には、気泡コンクリートへの固定化⁴⁾、マスコンクリートの冷却のためのドライアイス使用⁵⁾、廃棄コンクリートの活用⁶⁾などがある。また、最近では生コンクリートへCO₂を直接注入する方法⁷⁾や現場で

養生室を設ける方法⁸⁾など、高濃度のCO₂を積極的にコンクリートに固定化する方法について検討されている。また、プレキャスト製品やコンクリートブロックの蒸気養生の際のエネルギー削減と初期の強度発現を促進する目的で、高圧化で促進炭酸化する養生方法^{9)、10)}も検討されている。

しかしながら、コンクリート表面から内部への炭酸化の進行速度は非常に遅く、コンクリート製品や構造物へより多くのCO₂を短時間で固定化するには合理的な手段が必要になる。

このような背景から、本検討では、実際の工場で製造したJIS認定の即脱式コンクリート製品を対象とし、CO₂を固定化させるための最適な条件を構築することを目的とした基礎的な検討を行った。本報告では、3種類の即脱式コンクリート製品について、高圧注入試験装置を用いて高濃度かつ高圧のCO₂を注入し、炭酸化反応による質量変化や圧縮強度への影響、炭酸カルシウムの生成率およびCO₂固定化量について調べた。また、コンクリート製品工場での炭酸化養生槽の導入を想定し、実大養生槽を用いてインターロッキングブロック製造時のパレット積みでの養生条件を再現した検討を実施した結果について報告する。

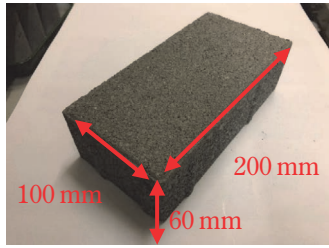
§2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

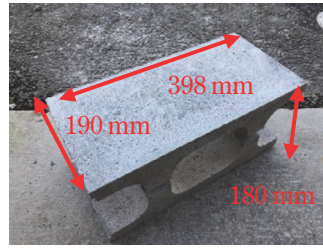
供試体は、実工場で製造されたインターロッキングブロック、縁石ブロックおよび擁壁ブロックをそれぞれ使用した。配合を表1に示す。また、供試体の写真

表1 コンクリート製品の配合、使用材料

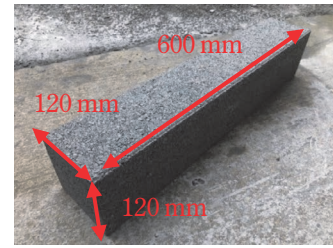
種類		W/C (%)	単位量 (kg/m ³)							
			W	C	S1	S2	G	AD1		
インターロッキング ブロック	表層	31.5	130	414	－	1672	634	2.48		
	基層	30.9	118	382	1168	－	－	1.53		
C：普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm ³ ）、S1：砕砂（表乾密度：2.64g/cm ³ ）、 S2：細目砂（表乾密度：2.54g/cm ³ ）、G：7号砕石（表乾密度：2.70g/cm ³ ）、AD1：白華抑制剤										
種類	W/B W/C (%)	単位量 (kg/m ³)								
		W	C	BF	S1	S2	S3	G	AD1	AD2
擁壁 ブロック	38	147	233	155	1185	180	263	184	－	4.66
縁石 ブロック	33	119	360	－	1269	－	－	548	1.44	－
C：普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm ³ ）、BF：高炉スラグ微粉末（密度：2.89g/cm ³ ）、 S1：砕砂（表乾密度：2.64g/cm ³ ）、S2：珪砂（表乾密度：2.65g/cm ³ ）、S3：珪砂（表乾密度：2.60g/cm ³ ）、 G：7号砕石（表乾密度：2.70g/cm ³ ）、AD1：白華抑制剤、AD2：内添型防水剤										



インターロッキングブロック (ILB)



擁壁ブロック



縁石ブロック

写真 1

を写真 1 に示す。即脱式のコンクリート製品は水セメント比が30～40%と小さく練り混ぜ後のフレッシュ性は流動性がほとんど無いことが特徴である。各製品は練り上がり後に型枠に打設され、圧縮成形および数秒間の振動締固め後に脱型される。脱型された製品は、工場内の製造プロセスではそのままベルトコンベアを介して積層され、所定の養生が行われる。今回は炭酸化養生の検討を行うため、脱型後の製品を直ちに工場から炭酸化養生用の試験装置のある大学の研究室に運搬し、20℃、湿度50%の恒温恒湿室にて炭酸化開始材齢まで気中養生を行った。

2.2 高圧注入試験装置による炭酸化養生方法

試験装置および試験方法の概略を図 1 に示す。試験は高圧注入試験装置を用い、養生槽内に 2～3 個程度のコンクリート製品をそれぞれ設置して炭酸化養生を実施した。養生槽内を CO₂ で満たすための前処理として真空ポンプによる脱気を 15 分間行った後、濃度 100% の CO₂ ガスを 1.0 MPa の圧力で注入した。CO₂ ガスは市販のボンベを用い、レギュレータによりガスの圧力を制御した。コンクリート製品はそれぞれ材齢 1 日、3 日、6 日において炭酸化養生を開始し、養生時間は 24 時間とした。炭酸化養生終了後、養生槽内からコンクリート製品を取り出し、炭酸化養生の前後で供試体の質量を測定して質量増加率を算出した。炭酸化養生を実施後は製品を 20℃、湿度 50% の恒温恒湿室にて養生し、材齢 7 日及び材齢 28 日において圧縮強度試験を実施した。材齢 1 日に炭酸化養生を実施したケースでは炭酸化養生実施直後の材齢 2 日においても圧縮強度試験を実施した。炭酸化養生を実施しない場合においても、コンクリート製品を同様に 20℃、湿度 50% の恒温恒湿室にて養生し、材齢 2 日、材齢 7 日及び材齢 28 日において圧縮強度試験を実施した。各コンクリート製品から角柱型の試験体を切り出し、圧縮強度用試験体とした。

炭酸化養生によるコンクリート製品への CO₂ の固定

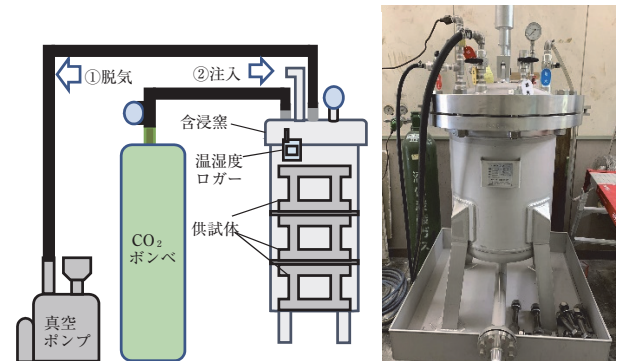


図 1 高圧注入試験装置による炭酸化養生の概要

化量を推定するため、示差熱重量分析 (TG-DTA) を実施した。コンクリート製品を粉碎して粉末状としたものを分析試料とした。試験条件としては、窒素フローの環境下で昇温速度を 10℃ /min とし、常温から 1000℃ まで測定を行い、405℃～515℃ における質量の減少を脱水による減量として水酸化カルシウム含有率を求め¹¹⁾、600℃～800℃ における質量の減少を CO₂ の脱炭素量として炭酸カルシウム含有率を求めた¹²⁾。

§ 3. 試験結果

3.1 質量増加率と圧縮強度

コンクリートの炭酸化は、コンクリート中の水酸化カルシウムや C-S-H などのセメント水和生成物が CO₂ と反応して炭酸カルシウムが生成する反応である。炭酸化が進行するとその炭酸化度に応じて一般的には質量増加がみられることが知られている。図 2 に炭酸化養生前後の質量増加率の測定結果を製品ごとに示す。凡例に示す 1d、3d、6d は炭酸化養生の開始材齢を示す。いずれのケースにおいても炭酸化後に質量増加がみられ、炭酸化開始材齢が 6d の場合に質量増加率が最も大きくなる傾向が示されていることが分かる。これは、既往の研究¹³⁾でも報告されているように、製造後に一定期間の材齢を確保してセメントの水和反応を進行させ、水和物を生成させた後に炭酸化養生を行うことで、質量増加率が大きくなるためである。

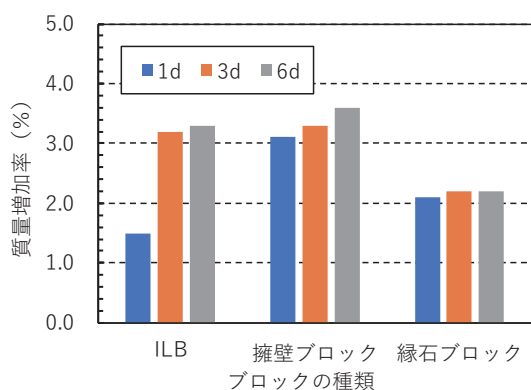


図2 質量増加率の測定結果

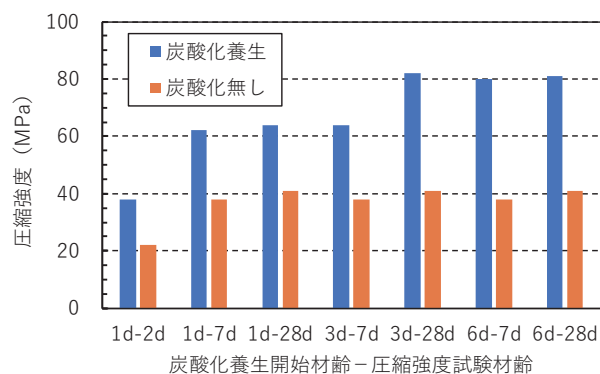


図3 インターロッキングブロックの圧縮強度試験結果

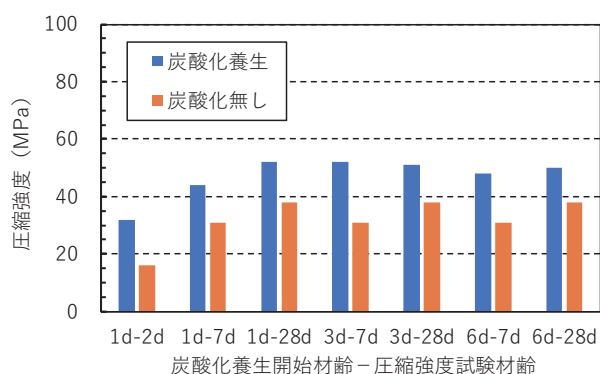


図4 擁壁ブロックの圧縮強度試験結果

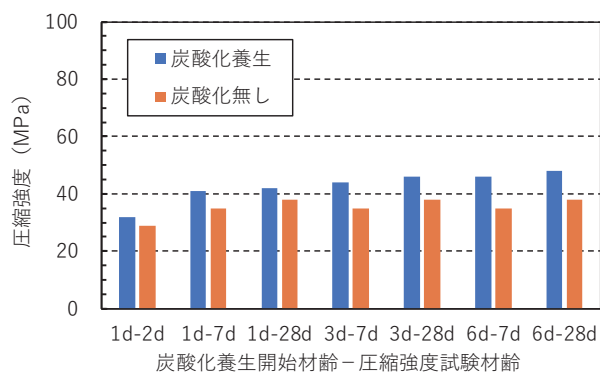


図5 緑石ブロックの圧縮強度試験結果

図3～5に各コンクリート製品の圧縮強度の試験結果を示す。横軸の各棒グラフの数字と記号は炭酸化養生を開始した材齢と圧縮強度試験を行った材齢を示す。例えば1d-28dは材齢1日に炭酸化養生を行い、その終了後に恒温恒湿室において養生を継続し、材齢28日に圧縮強度試験を実施したことを示す。また、比較のため、炭酸化養生を行わず気中養生した場合の圧縮強度についても併せて示した。いずれの製品においても、炭酸化養生を施すことで圧縮強度が増加することが確認された。また、炭酸化開始材齢が3日または6日の場合において、圧縮強度がより大きくなる傾向が認められた。特に、インターロッキングブロックにおいては、この傾向が顕著に表れていることが分かる。

3.2 熱分析結果

表2～4に示差熱重量分析 (TG-DTA) の結果から算出した水酸化カルシウム (以下、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$) と炭酸カルシウム (以下、 CaCO_3) の含有率 (%), CO_2 固定化量 ($\text{kg-CO}_2/\text{m}^3\text{-Block}$) を示す。 CO_2 固定化量は、炭酸化による体積変化を考慮した硬化体の密度を用いて試算することが望ましいが、本報告では表1に示す各ブロックの配合から単位容積質量を用いて

表2 TG-DTAの結果 (インターロッキングブロック)

供試体名	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率 (%)	CaCO_3 含有率 (%)	CO_2 固定化量 ($\text{kg-CO}_2/\text{m}^3\text{-Block}$)
炭酸化なし	4.6	—	—
炭酸化-1d	2.9	7.7	68
炭酸化-3d	2.9	8.0	71
炭酸化-6d	3.1	9.2	76

表3 TG-DTAの結果 (擁壁ブロック)

供試体名	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率 (%)	CaCO_3 含有率 (%)	CO_2 固定化量 ($\text{kg-CO}_2/\text{m}^3\text{-Block}$)
炭酸化なし	1.9	—	—
炭酸化-1d	3.6	7.9	81
炭酸化-3d	3.8	9.4	96
炭酸化-6d	3.7	9.5	98

表4 TG-DTAの結果 (緑石ブロック)

供試体名	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率 (%)	CaCO_3 含有率 (%)	CO_2 固定化量 ($\text{kg-CO}_2/\text{m}^3\text{-Block}$)
炭酸化なし	0.5	—	—
炭酸化-1d	0.6	7.0	72
炭酸化-3d	0.5	7.2	74
炭酸化-6d	0.6	7.4	76

1m³あたりのCO₂固定化量として試算した。表中には炭酸化なしの場合の含有量を差し引いた値を示す。いずれの製品も炭酸化前の養生期間を設けてから炭酸化試験を行った際に最もCaCO₃とCO₂固定化量が高くなっていることが分かる。図6に質量増加率とCO₂固定化量の関係を示す。各コンクリート製品のセメントの種類や配合条件によって質量増加率やCO₂固定化量は異なり、また今回のケースではサンプル数も少なく検討の余地があるが、質量増加率の増加に伴ってCO₂固定化量は線形的に増加することが分かる。今後、コンクリート製品工場のCO₂固定化量の管理や炭酸化の程度を推定する方法として質量増加率を用いることができるものと考えられる。

§4. 大型養生槽を用いた検討

4.1 検討概要

実工場における炭酸化養生の適用を想定し、大型養生槽を用いた検討を実施した。実際の工場では、製品はパレット単位で積層された状態で製造および養生が行われる。そこで本検討では、パレットの積層状態での炭酸化養生を再現するため、写真2に示すようにインターロッキングブロックを縦4個、横3個、高さ7段の計84個に積層した条件で炭酸化養生試験を行っ

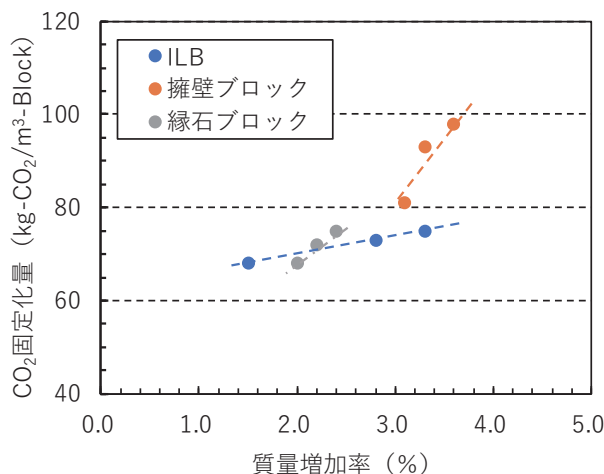


図6 質量増加率とCO₂固定化量の関係

た。インターロッキングブロックの使用材料および配合を表5に示す。なお、本検討における配合は表1に示すインターロッキングブロックの使用材料とは異なり、セメントとしてエコセメントを使用し、さらに溶融スラグを混和している。大型養生槽においては、槽内の温度および湿度分布、炭酸化反応に伴う発熱挙動、CO₂濃度の分布、ならびに炭酸化養生後のCO₂固定化量の位置によるばらつきを把握することが重要である。本報では、これらのうちインターロッキングブロックの質量変化率およびCO₂固定化量に関する分析結果の一部を報告する。試験体は工場での製造後の材齢3日において炭酸化養生を開始した。養生条件は槽内温度40℃、CO₂濃度100%、圧力1.0MPaとし、養生時間は12時間として実施した。

4.2 試験結果

図7に、養生槽内に設置したインターロッキングブロック84個の質量増加率を示す。試験体番号は、最下段をNo.1～12、各段12個ずつ配置し、最上段をNo.73～84とした。図に示すとおり、84体の質量増加率の平均値は2.79%であり、変動係数は10%であった。ブロックの積層位置に着目すると、上下方向および左右方向における質量増加率に明確な偏在傾向は認められなかった。また、特定の位置において炭酸化反応の進行が著しく抑制される現象も確認されなかった。以上よ



写真2 大型養生槽を用いた検討状況

表5 ブロックの配合

	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)									
		W	C	BF	7号碎石	砕砂	溶融スラグ	珪砂	川砂	石灰砂	白華抑制剤
表層	31.5	130	265	158	—	—	—	896	319	479	1.82
基層	30.0	118.4	270	106	621	965	259	—	—	—	1.50

C：エコセメント（密度：3.15g/cm³）、BF：高炉スラグ微粉末（密度：2.89g/cm³）、7号碎石（表乾密度：2.67g/cm³）、砕砂（表乾密度：2.70g/cm³）、溶融スラグ（表乾密度：2.90g/cm³）、珪砂（表乾密度：2.56g/cm³）、川砂（表乾密度：2.54g/cm³）、石灰砂（表乾密度：2.68g/cm³）

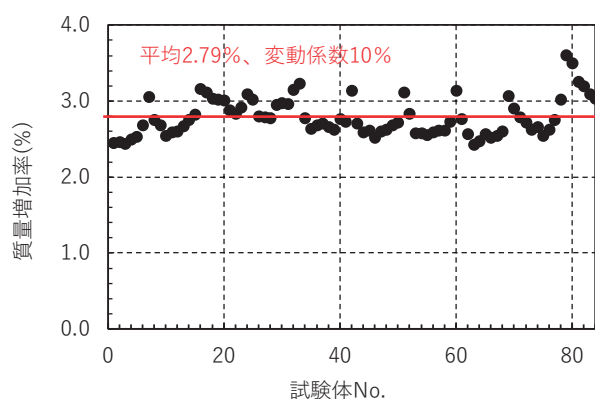


図7 試験体 No. と質量増加率

り、養生槽内においてはブロックが積層状態にもかかわらず、積層位置に依存せずに全体的に均一な炭酸塩化反応が生じており、質量増加がみられることが明らかとなった。

表6にTG-DTAの試験結果を示す。試験体としては、炭酸塩化未実施のケースに加え、最下段のNo.1、下から4段目の中央付近に位置するNo.44、および最上段のNo.84の結果を例として示した。その結果、積層位置によらず、いずれの試験体においても約85~90 (kg-CO₂/m³-Block) のCO₂が固定化されていることが確認された。

§5. まとめ

本研究では、実際の工場で製造される即脱式コンクリート製品を対象として、CO₂を効率的に固定化するための手法の構築を目的に実験的検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 3種類の即脱式コンクリート製品に対し、高圧注入試験装置を用いて高濃度かつ高圧のCO₂を注入し、炭酸塩化反応に伴う質量変化、圧縮強度への影響、炭酸カルシウム生成率およびCO₂固定化量について評価した。その結果、炭酸塩化開始材齢を3日および6日とし、水和反応をある程度進行させることで、炭酸塩化反応による質量増加率および圧縮強度をより増加できることが確認された。
- (2) 炭酸塩化養生による質量増加率とCO₂固定化量との

間には線形関係が認められ、質量変化を指標としてCO₂固定化量を評価できる可能性が示唆された。

- (3) コンクリート製品工場への炭酸塩化養生槽の適用を想定し、実大規模の養生槽を用いてインターロッキングブロックのパレット上での積層状態を再現した炭酸塩化養生実験を実施した。その結果、養生槽内においては積層位置によらず炭酸塩化反応が均一に進行し、全ての供試体で質量増加が認められた。このことから、積層状態の製品に対してもCO₂固定化が均質に行われることが確認された。

謝辞

本検討に際し、エスビック株式会社の悴田様、砂皿様、猪俣様、中村様、株式会社福島シービー社の佐治様に多大なるご協力をいただきました。また、本研究は日本大学工学部のパリーク教授との共同研究において実施しました。ここに、関係各位の皆様には謝意を示します。

参考文献

- 1) カーボンリサイクル技術ロードマップ ウェブサイト <https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.pdf>
- 2) ICEF 2016 ロードマップ ウェブサイト https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2016_roadmap1.pdf
- 3) CARBON MINERALIZATION ROADMAP ウェブサイト https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2021_roadmap.pdf (閲覧日：2024年3月6日)
- 4) 柱国：気泡コンクリートに用いる二酸化炭素固定化に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第81巻、第721号、pp.405-414、2016
- 5) 竹内光、辻幸和：冷却媒体としてドライアイスを用いたプレクーリング工法の基礎研究、土木学会論文集、No.544/V-32、pp.53-64、1996
- 6) 飯塚淳ほか：二酸化炭素を用いた廃コンクリートのリサイクル技術、コンクリートテクノ、Vol28、No.7、pp.24-27、2009

表6 TG-DTAの試験結果

試験体名	TG/DTA		CO ₂ 固定化量 (kg-CO ₂ /m ³ -Block)
	Ca(OH) ₂ 含有率 (%)	CaCO ₃ 含有率 (%)	
炭酸塩化なし	1.9	—	—
No.1	3.7	15.1	91
No.44	3.5	14.6	86
No.84	3.6	14.9	88

- 7) Sean Monkman et al : Sean Monkman, Mark MacDonald, R. Doug Hooton, Paul Sandberg : Properties and durability of concrete produced using CO₂ as an accelerating admixture, Cement and Concrete Composites, 74, pp.218-224, 2016
- 8) 小林聖、取違剛、渡邊賢三、横関康祐 : 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、Vol42、No.1、pp.1348-1353、2020
- 9) Rostami, V. et al : Carbonation Curing versus Steam Curing for Precast Concrete Production, Journal of Materials in Civil Engineering, Voi24, Issue9, pp.1221-1229 (2012)
- 10) Caijun Shi et al : Acceleration carbonation as a fast curing technology for concrete blocks, sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites, pp.313-341 (2017)
- 11) 坂井悦郎ほか : セメントの水和の相組成モデル、コンクリート工学年次論文報告集、Vol20、No.1、pp.101-106、1998
- 12) 黒田康弘、菊池俊文 : 解体コンクリートによる二酸化炭素の固定、コンクリート工学年次論文集、Vol20、No.1、pp.15-22、2009
- 13) 藤倉裕介、Sanjay. Pareek : 高圧高濃度のCO₂環境下における硬化コンクリートの炭酸化進行モデル、セメント・コンクリート論文集、Vol.77、pp.273-281、2023

ひとこと

脱炭素社会の実現に向けて、コンクリート分野におけるCO₂の排出量削減と固定化に資する技術開発・社会実装と、それらの効果を定量的に評価する手法の確立が、今後ますます重要になると考えられる。



藤倉 裕介