

論文 アルミ繊維等を用いて透水・透気性を高めたコンクリートによる CO₂ 固定に関する基礎検討

林 俊斉*1・高木 亮一*2・湊 太郎*3・坂本 守*4

要旨: 本研究では、CO₂ で製造したマイクロナノバブル水を使用した液相炭酸化養生により、材齢初期にコンクリート内部まで CO₂ を固定可能な現場打ちコンクリートについて、アルミ繊維等を用いて透水性を付与する方法について検証した。その結果、アルミ繊維、天然繊維を用いることで目標とした透水係数 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度を得ることができた。一方、液相炭酸化養生による CO₂ 含有量は想定を下回る結果となった。検証の結果、マイクロナノバブル水の pH および透水速度に原因があると考えられた。

キーワード: アルミ繊維、マイクロナノバブル水、液相炭酸化養生、CO₂ 固定、現場打ちコンクリート

1. はじめに

2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指すことを政府が宣言し、あらゆる分野で脱炭素化の流れが加速している。

建設分野においては、コンクリートに使用されるセメントが製造段階で CO₂ を多量に排出することが課題とされている。令和3年度の生コンクリート出荷量は約7,600万 m³ であり、コンクリート 1m³ あたりの CO₂ 排出量を約 300kg-CO₂/m³ とすると、年間約 2,300 万 t-CO₂ が排出されていることになる。一方、セメント・コンクリートは供用段階で CO₂ を吸収する。これは中性化と呼ばれ、鉄筋コンクリート構造物の劣化要因の一つとして扱われてきた。しかし、中性化は鋼材腐食の原因となるものの、コンクリート自体に悪影響を及ぼすものではない。コンクリートが供用段階に吸収する CO₂ 量は、セメント消費量に基づく脱炭素由来の CO₂ 排出量に対して 9~23% と算定され¹⁾、CO₂ の貯留先として非常にポテンシャルが高いと考えられる。

本研究は、現場打ちコンクリートへの適用を前提として、現場で実施する CO₂ で製造したマイクロナノバブル水（以下、MNB 水）等を用いた液相炭酸化養生により内部まで積極的に中性化を促進できる、すなわち、CO₂ を固定化できるコンクリートの実現を目指したものである。従来のコンクリートよりも透水性の高いコンクリートを作製し、液相炭酸化養生後の CO₂ 含有量について基礎検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 コンセプト

本研究では、現場打ち可能なコンクリートを前提とし

て、MNB 水等を使用した液相炭酸化養生により、材齢初期にコンクリート内部まで CO₂ を固定可能なコンクリートとする。コンクリート内部への CO₂ 供給方法は、コンクリート中に連続空隙を形成する方法とし、一般のコンクリートに比べて透水性の高いコンクリートとする。一方、構造部材への適用可能性を考慮してポーラスコンクリートよりも透水性が小さいコンクリートについて検討する。

2.2 透水係数の目標値

一般的なコンクリートの透水係数は $1 \times 10^{-9} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-12} \text{cm/s}$ 程度である²⁾。一方、ポーラスコンクリートの透水係数は $1 \times 10^{-1} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 程度である³⁾。本研究では、ポーラスコンクリートよりも透水性が小さく、適度な圧力で透水可能と想定される透水係数として、 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度の範囲を目標値とした。

2.3 コンクリート使用材料

本研究における検討材料を表-1に示す。また、アルミ繊維および天然繊維の外観を写真-1に、天然繊維のSEM画像を写真-2に示す。ポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維）はコンクリート用に市販されている繊維である。アルミ繊維は、市販のアルミ箔を長さ 25mm、幅 4mm で裁断したものとした。厚さは 12μm 程度である。一般にアルミニウムは強アルカリと容易に反応して水素が発生するため、コンクリート分野ではアルミニウム粉末を発泡剤として活用している。本研究においては、アルミ繊維の溶解に加え、発生する水素ガスが連続空隙を形成することを期待するものである。天然繊維のサイザル麻は、写真-2に示す断面のように、繊維中の道管が連続空隙としての役割を担うことを期待するものである。

*1 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部主任研究員 修士 (工学) (正会員)

*3 青木あすなる建設 (株) 技術研究所材料研究部部長 博士 (工学) (正会員)

*4 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部部長 博士 (工学) (正会員)

2.4 コンクリートの配合検討

コンクリートの透水・透気性を高める方法として、水セメント比（以下、W/C）増大、空気量増大、繊維混入等の方法が、意図的に微細なひび割れを硬化初期に発生させる方法として、若材齢時に高温履歴付与、膨張材過添加等の方法が考えられる。本研究では、予備試験として各種検討配合による供試体を作製し、吸引による負圧透水試験によりコンクリートの透水係数の検証を行った。フレッシュ性状および硬化性状の確認は、スランプ試験（JIS A 1101）、空気量試験（JIS A 1128）および圧縮強度試験（JIS A 1108）を行った。予備試験の結果、目標とす

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	N	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末 密度 2.89g/cm ³
細骨材	S	静岡県掛川産山砂 密度 2.57g/cm ³
粗骨材	G	茨城県桜川産砕石 密度 2.64g/cm ³
	GL	再生骨材 L 密度 1.87g/cm ³
膨張材	EX	石灰系低添加型 標準使用量 20kg/m ³
混和剤	AD1	AE 減水剤
	AD2	高性能 AE 減水剤
	AD3	AE 剤
繊維	PF	ポリプロピレン繊維 繊維長 10mm, 20mm
	AF	アルミ繊維（アルミ箔） 繊維長 25mm
	NF	天然繊維（サイザル麻） 繊維長 5mm, 15mm

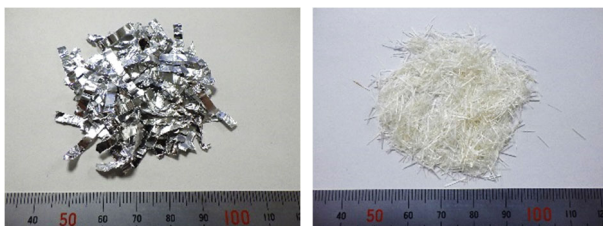


写真-1 繊維の外観
アルミ繊維（アルミ箔） 天然繊維（サイザル麻）

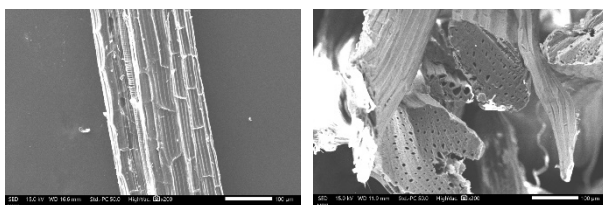


写真-2 天然繊維のSEM画像
表面 断面

る透水係数が得られた配合について、CO₂含有量を詳細に分析した。

2.5 MNB水（CO₂で製造したマイクロナノバブル水）

MNB水は二相流旋回方式のノズルを有する発生装置を介して製造され、必要とするCO₂流量は1L/min、水量は20L/minである。MNB水製造時のpHおよびCO₂濃度の変化を表-2に示す。また、図-1に示すように、試験時には事前にCO₂が飽和状態となるように十分溶解させた状態で開始し、試験時も常時発生装置で循環させ、同程度のCO₂濃度を維持させた。

2.6 液相炭酸化養生（吸引による負圧透水試験）

液相炭酸化養生装置の概略図を図-1に、供試体設置状況を写真-3に示す。供試体寸法はΦ100×100とし、側面はシール面、上下面は開放面とした。MNB水を生成できる水槽に供試体を3日間浸漬し、供試体下面は真空ポンプに接続した。真空ポンプの吸引圧力は、最大0.08MPaの負圧とし、透水量に応じて圧力調整した。

なお、設置する供試体は、材齢28日に達する前に液相炭酸化養生するため、材齢3日で蒸気養生（65℃、72時間）を実施し、セメントの水和反応を十分に促進させることで試験材齢の違いの影響を極力抑制することとした。

2.7 気相炭酸化養生（中性化促進試験）

気相炭酸化養生は中性化促進試験で使用する中性化槽で行い、温度20℃、相対湿度60%、CO₂濃度5%とし、期

表-2 MNB水製造時のpHおよびCO₂濃度変化

製造時間(分)	0	1	2	4
水温(℃)	23.0	23.1	23.4	23.6
pH	6.02	4.35	4.19	4.10
CO ₂ 濃度(mg/L)	6.03	180	450	810

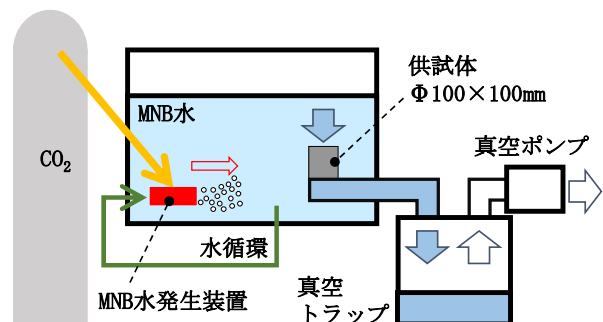


図-1 液相炭酸化養生（吸引による負圧透水試験）

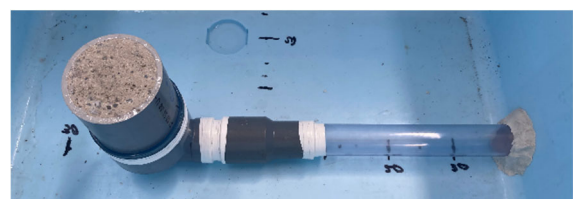


写真-3 供試体設置状況

表-3 予備試験の検討項目と評価

検討項目		試験水準 ※下線の水準について 試験値を右欄に示す	圧縮強度 材齢 28 日 (N/mm ²)	透水係数 (cm/sec)	備考 (使用材料、フレッシュ性状)	透水性評価 ○△透水有 × 透水無
配合	W/C	45, 55, 70, 200, <u>400</u> %	2.3	7.5×10^{-6}		△
	空気量	4.5, 8.0, 20, <u>30</u> %	6.3	3.3×10^{-7}	空気量調整剤, 発泡剤	△
材料	PP 繊維	0.5, 1.0, <u>2.0</u> Vol%	13.6	透水せず		×
	膨張材	25, 35, <u>45</u> kg/m ³	25.6	透水せず		×
	アルミ繊維	<u>0.1875</u> Vol%	11.5	2.1×10^{-4}		○目標値付近
硬化後	高温履歴	<u>蒸気養生</u>	23.4	透水せず	高炉セメントC種相当	×

間は3日間とした。なお、設置する供試体は前項と同様に蒸気養生を実施した。

2.8 CO₂含有量分析方法

液相炭酸化養生および気相炭酸化養生実施後、供試体を割裂し、断面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して、中性化の進行状況を確認した。

さらに、テストピースを全量粉砕し、示差熱重量分析(以下、TG-DTA)によりCO₂含有量を評価した。なお、CO₂含有量として評価した温度帯は550~900°Cとした。また、透過水は、イオンクロマトグラフ分析(以下、IC)によりイオン分析を実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 予備試験

予備試験の検討項目と評価を表-3に示す。予備試験では、基本配合の条件をW/C=55%、細骨材率s/a=45%、目標空気量4.5±1.5%、目標スランブ12±2.5cmとして検討項目の水準のみを変えて試験を実施した。基本配合では材齢28日の圧縮強度が32.6 N/mm²、負圧透水試験では透水を確認できなかった。検討項目ごとに、透水係数 1×10^{-3} cm/s~ 1×10^{-4} cm/s程度を満足する条件を調査した。

W/Cは400%まで増大した場合に、空気量は30%程度まで増大した場合に、それぞれ透水係数が 1×10^{-7} cm/s程度まで大きくすることができた。一方で、透水係数の増加とともに圧縮強度は小さくなることに加え、配合条件では目標透水係数の確保が困難であった。

PP繊維を添加すると添加量の増加に伴いスランブが低減した。本試験では試験体成型が可能であった2.0Vol%までの添加量の範囲を検討したが、すべての水準で吸引による透水は確認できなかった。PP繊維混入により中性化の進行が早くなることが確認されている⁹⁾ことから、PP繊維による気体の拡散が増加するメカニズムと同様に透水係数の増加も期待したが、本試験ではPP繊維の使用による透水を確認できなかった。

膨張材は標準使用量を超えた量を使用することで膨張量が過剰となり、内部に欠陥が生じることによる透水量の増加を期待したが、その効果は確認できなかった。

若材齢時にコンクリートが高温履歴を受けると、粗骨



写真-4 アルミ繊維入り供試体の膨張状況

材とセメントペーストの熱膨張係数の差を主要因とした微細な内部損傷が生じるとする報告⁹⁾がある。そこで熱膨張係数の差を顕著にするために普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で70%置換した配合(高炉セメントC種相当)において、蒸気養生(前置き20°C、昇温速度20°C/h、65°Cを2時間保持、20°Cまで降温速度3°C/h)による高温履歴を与えた。しかし、本試験では高温履歴を与えた試験体による透水は確認できなかった。

アルミ繊維は前述の通り、発生する水素ガスが連続空隙を形成することを期待して試験を実施した。その結果、試験体打込み後1時間程度で試験体の表面が盛り上がる状況(写真-4)を確認でき、透水係数は 2.1×10^{-4} cm/secとなり、目標値を満足した。圧縮強度は基本配合よりも低下するもののW/Cや空気量の増加のような顕著な強度低下までは至っていなかった。

以上の予備試験の結果から、アルミ繊維を用いた検討を実施することとした。

3.2 アルミ繊維および天然繊維を使用した試験

(1) フレッシュ性状および硬化性状

アルミ繊維および天然繊維を使用した配合検討結果を表-4に示す。アルミ繊維の添加量の増大とともにスランブは小さくなったが、空気量は一般のコンクリートと同様に安定的であった(A1~A4)。また、アルミ繊維の添加量0.2Vol%程度であれば、混和剤の種類あるいは添加量を調整することで目標スランブが得られることを確認した(A3, B1, B2)。

アルミ繊維の添加量と膨張率および圧縮強度の関係を図-2に示す。なお、膨張率は、Φ125×250mmのモールドに高さ100mm程度までコンクリートを投入し、コ

表-4 アルミ繊維および天然繊維を使用したコンクリートの配合および基本性状

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				添加量 (Vol%)		添加量 (C×%)			フレッシュ性状			圧縮強度* (N/mm ²)	
			W	C	S	G	AF	NF 5mm	AD1	AD2	AD3	スランプ (cm)	空気量 (%)	膨張率 (%)	7日 気中	28日 水中
A1	55.0	44.0	165	300	781	1022	0	—	0.7	—	1A	14.5	3.8	0	18.4	26.7
A2							0.1	—	1.2	—	1A	11.0	4.9	9.0	11.4	14.7
A3							0.2	—	1.5	—	1A	9.5	4.9	12.7	8.93	13.4
A4							0.4	—	1.5	—	1A	2.1	5.4	14.1	4.98	11.5
B1	45.0	42.0	367	722	1024	0.2	—	—	0.7	1A	13.5	5.6	12.5	14.2	19.5	
B2	35.0	40.0	471	653	1006	0.2	—	—	0.6	0	9.5	4.3	8.1	22.3	27.1	
C	55.0	44.0	300	781	1022	0.1	1.0	1.5	—	0	6.0	5.6	—	10.0	13.6	

※ 材齢7日までは気中養生。その後、材齢28日まで標準水中養生した場合の結果。

コンクリート上面で測定した膨張後の高さの変化量から簡易に算出した。アルミ繊維の添加量の増大とともに膨張率が大きくなる一方、添加量が同じでも W/C が小さくなるほど膨張率は小さくなった (A3, B1, B2)。圧縮強度も同様の傾向を示し、アルミの添加量の増大とともに空隙量が増加するため圧縮強度が低下する一方、W/C が小さくなるほど圧縮強度が大きくなり改善できることが確認できた (A3, B1, B2)。天然繊維を併用した場合は、アルミ繊維の添加量が同等の場合と比較して、AE 減水剤の添加量を増やしても大きくスランプが低下した (A2, C)。圧縮強度は天然繊維を併用した方が若干低下する程度であった (A2, C)。

(2) 負圧透水試験と透水係数

負圧透水試験の結果を表-5 に、アルミ繊維の添加量と透水係数の関係を図-3 に示す。アルミ繊維を添加することで、 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度の目標とする透水係数が得られた (A2~C)。また、アルミ繊維の添加量が大きいくほど透水係数は大きく (A1~A4)、W/C が小さいほど透水係数は小さく (A3, B1, B2) になった。

4. CO₂ 固定評価と考察

TG-DTA の結果を表-6 に、CO₂ 含有量を図-4 に示す。水酸化カルシウム Ca(OH)₂ (以下, CH) 量および炭酸カルシウム CaCO₃ (以下, CC) 量と合わせて CO₂ 含有量を示した。初期値とは、気相炭酸化養生および液相炭酸化養生の開始材齢における蒸気養生後の供試体による分析結果である。いずれのケースにおいても 2 章で示した方法による液相炭酸化養生では、気相炭酸化養生ほどの CO₂ 含有量は得られなかった。

なお、気相炭酸化養生の結果によると、アルミ繊維の添加量を変化させても CO₂ 含有量は変化がなかった (A1~A4)。天然繊維を併用した場合は CO₂ 含有量が 29.9kg/t と最も大きくなった (C)。これは、天然繊維の道管が連続空隙の役割を担い、内部まで CO₂ を供給できた可能性がある。なお、天然繊維に含まれるセルロースは 350°C 付近の温度域で急激に熱分解される⁶⁾ため、

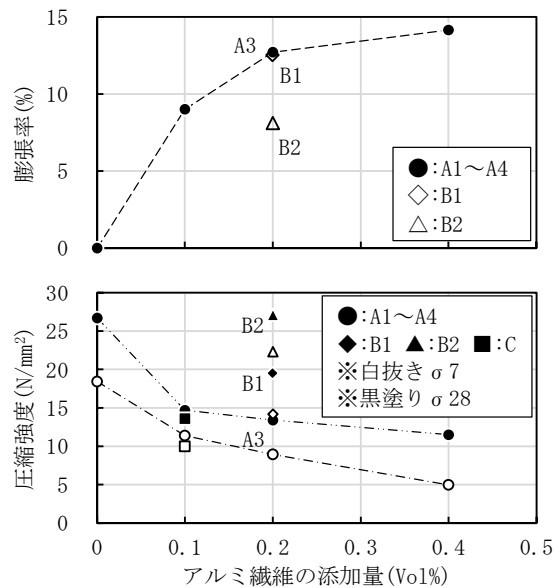


図-2 アルミ繊維の添加量と膨張率・圧縮強度の関係

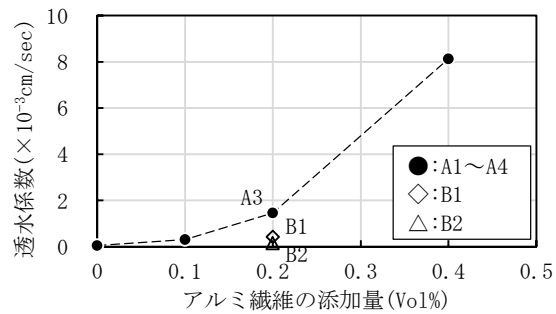


図-3 アルミ繊維の添加量と透水係数の関係

表-5 負圧透水試験による透水係数

記号	吸引時間 (h)	CO ₂ 溶存濃度 (g/mL)	総透水量 (L)	透過 CO ₂ 量 (kg/m ³)	透水係数 (cm/sec)
A1	69	1980	16	40	4.2×10^{-5}
A2	73	1733	55	121	3.1×10^{-4}
A3	73	1733	241	531	1.5×10^{-3}
A4	71	1795	581	1329	8.1×10^{-3}
B1	71	1846	100	235	4.1×10^{-4}
B2	73	1733	30	66	1.5×10^{-4}
C	71	1846	77	182	2.0×10^{-4}

表-6 TG-DTA 結果

記号	初期値			気相炭酸化養生			液相炭酸化養生		
	CH 量 (%)	CC 量 (%)	CO ₂ 含有量 (kg/t)	CH 量 (%)	CC 量 (%)	CO ₂ 含有量 (kg/t)	CH 量 (%)	CC 量 (%)	CO ₂ 含有量 (kg/t)
A1	2.90	3.22	14.2	3.04	5.77	25.4	3.04	3.65	16.1
A2	3.04	3.43	15.1	1.96	5.68	25.0	2.47	3.74	16.5
A3	2.29	2.88	12.7	1.62	5.79	25.5	1.83	3.70	16.3
A4	1.99	3.38	14.9	1.32	5.55	24.4	1.11	4.51	19.9
B1	3.01	2.98	13.1	2.43	6.45	28.4	2.57	4.37	19.2
B2	3.37	3.86	17.0	2.84	5.39	23.7	3.37	4.70	20.7
C	2.05	4.17	18.3	1.23	6.80	29.9	2.34	4.07	17.9

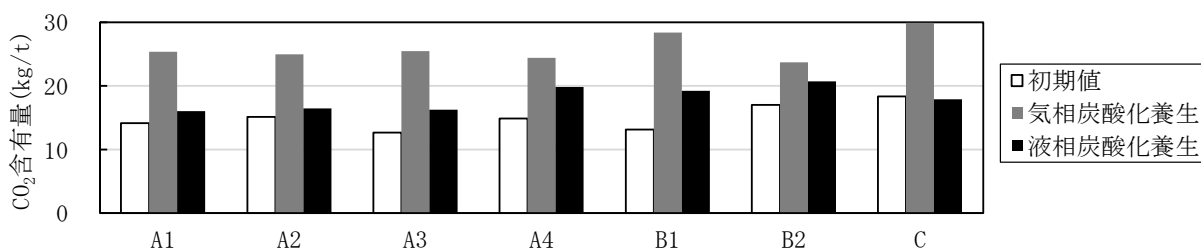


図-4 CO₂ 含有量

550～900℃の温度帯を対象とした CO₂ 含有量への影響は軽微と考えられる。

5. CO₂ 固定反応に対する一考察

前項の結果を受け追加実施した透過水の IC の結果を表-7 に示す。ただし、本結果は表-6 試験時のサンプルではないため参考値とする。MNB 水の原水の Ca²⁺量 29.5mg/L および HCO₃⁻量 97.6mg/L に対して、透過水の Ca²⁺量 47.8～73.7mg/L, HCO₃⁻量 178.1～273.3mg/L であり、両イオンとも透過後に増えていることを確認した。

本研究では、可能な限り多くの CO₂ をコンクリート内部に供給し、CC として固定化することを期待していた。しかし、文献⁷⁾⁸⁾によると、MNB 水の pH および透水速度が CO₂ 固定の阻害要因であると考えられる。

一般的なコンクリートの炭酸化の反応では、細孔溶液中の pH が高いため CO₂ の侵入により炭酸イオン (CO₃²⁻) と Ca²⁺ が反応し CC が固相に沈積する。負圧透水試験では、pH5 程度の MNB 水を一定水量で細孔中を透過させているため、細孔溶液の pH を高アルカリ側で保持できず、pH 低下により炭酸水素イオン (HCO₃⁻) の状態で存在し (図-5)、Ca²⁺ と反応後、重炭酸カルシウム Ca(HCO₃)₂ に変化して MNB 水に溶解した状態でコンクリート外部へ運ばれたと考えられる。コンクリート内部を MNB 水が透過する際、コンクリート表面から CH を起源とする Ca²⁺ と OH⁻ の溶出が起きているため、MNB 水の pH は 7 程度まで僅かながら上昇したと思われる。それでも、HCO₃⁻ の存在量は、図-6 から 10⁻⁴～10⁻³ のオーダーであり圧倒的に少ない。そのため、重炭酸カルシ

表-7 透過水の IC 結果

記号	pH	Ca ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
(原水)	5.1	29.5	97.6
A2	6.9	47.8	178.1
A3	6.7	58.4	217.2
A4	6.5	59.1	219.6
B1	7.1	73.7	273.3
B2	7.2	68.8	253.8

ウム Ca(HCO₃)₂ が生成したとしても、相当少ない量であったと考えられる。

さらに、図-5 によると pH が低い溶液では、溶液中に存在できる CO₃²⁻ 量が少ない上、流水では反応時間が足りないことが推察される。一般に、液相と接する固相の表面近傍には、固相表面を構成する物質の官能基がイオン吸脱着反応することで電場が生じており、この電場によって液相 (本論文では MNB 水が該当) とイオン組成が異なる電気二重層が形成されている⁹⁾¹⁰⁾。セメント系材料の場合も同様であり、固相から溶出した Ca²⁺ などが、この電気二重層を形成していると考えられる¹¹⁾。電気二重層の内部では、イオンの濃度が固相表面近傍で高く液相に向かって低くなる指数関数的な濃度勾配が生じる⁹⁾。この濃度勾配に応じて、固相から溶出した Ca²⁺ などが、固相表面から液相に向かって拡散する。固相からの距離が大きくなるほど、イオンの自由度は増しており、液相に一定方向の流れがあれば、拡散したイオンは液相の流れに逆らわず移動し、場合によっては系外へ排出されることになる⁹⁾。

このような場合、液相中に CO_3^{2-} が豊富に存在し Ca^{2+} と反応したとしても、CC の沈殿がコンクリート内部で起き難いと考えられる。特に、MNB 水の流速が極端に大きい場合は、コンクリートの外部で沈殿するしかない。写真-6 に示すように液状炭酸化養生後の供試体底面（切断面）に白く CC の析出が確認されたのは、このような理由によると思われる。

6. まとめ

本研究では、アルミ繊維等を用いて透水・透気性を高めたコンクリートによる CO_2 固定に関する基礎検討を実施した。以下に得られた結論をまとめる。

- (1) アルミ繊維を使用することで、コンクリートの透水係数を $1 \times 10^{-3} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度にできた。アルミ繊維の溶解に加え、発生する水素ガスが連続空隙を形成したものと考えられる。
- (2) 本研究の方法による液状炭酸化養生では、気相炭酸化養生による CO_2 含有量を下回った。コンクリート中で CC として析出させるためには、pH を上昇させて CO_3^{2-} 溶存量を増やし、流量を調整して Ca^{2+} との反応時間を確保する必要がある。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の業務委託 (JPNP21023) の一環として行ったものです。東京大学の野口貴文教授および東京都立大学上野敦准教授には、考察に関するご助言をいただきました。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 兵頭彦次, 星野清一, 平尾宙, 野村幸治: ライフサイクルを通じたコンクリートの CO_2 吸収量算定に関する研究, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.74, pp.333-340, 2021.3
- 2) 日本コンクリート工学会: コンクリート技術の要点'21, pp.77-78, 2021.9
- 3) 梶尾聡, 中村秀三, 野田悦郎, 中原大磯: ポーラスコンクリート舗装の品質特性と供用性に関する報告, *コンクリート工学*, Vol.42, No.7, pp.24-31, 2004.7
- 4) 堀口賢一, 丸屋剛: ポリプロピレン繊維を混入したコンクリートの耐久性, 土木学会年次学術講演会, Vol.63, V-268, pp.535-536, 2008.9
- 5) 藤原浩一, 細田暁, 相澤健太: 高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートの引張性状, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.29, No.2, pp.169-174, 2007.6
- 6) 河本晴雄: セルロースの熱分解反応と分子機構: 木材

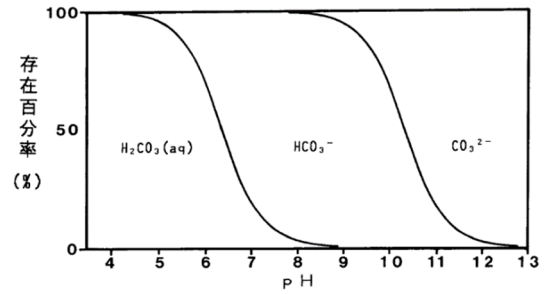


図-5 溶液の pH と炭酸の解離状態⁷⁾

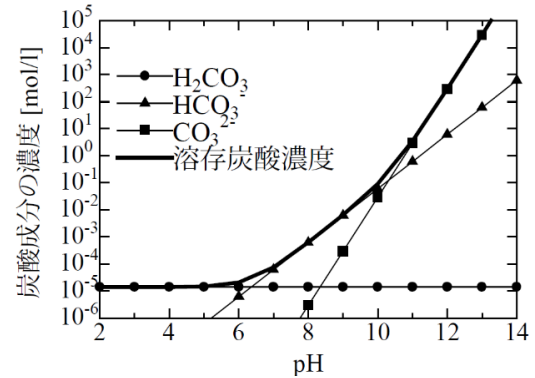


図-6 pH と炭酸成分の存在比の関係⁸⁾

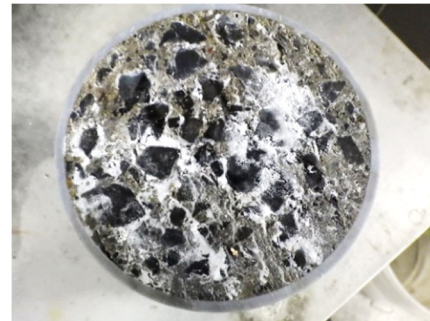


写真-6 液状炭酸化養生後の供試体底面

- 学会誌, Vol.61, No.1, pp.1-24, 2015.1
- 7) 小林一輔, 宇野祐一: コンクリートの炭酸化メカニズム, *コンクリート工学論文集*, Vol.1, No.1, pp.37-49, 1990.1
- 8) 佐々木崇, 島袋出, 大下英吉: 細孔溶液中のアルカリイオン濃度に基づくコンクリートの炭酸化に関する解析的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.27, No.1, pp.643-648, 2005.6
- 9) 鈴木祥仁, 深尾浩次共訳: プット・グラフ・カペル界面の物理と化学, 丸善出版, pp.53-91, 2016.10
- 10) 菊池道生, 金沢貴良, 斎藤 豪, 佐伯竜彦: セメント系硬化体の電気抵抗率とその影響因子に関する検討, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.66, pp.189-196, 2013.2
- 11) 後藤誠史, 茂啓二郎, 高木達雄, 大門正機: セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散, *セメント技術年報*, Vol.36, pp.49-52, 1982.1