

論文 気泡コンクリートによる二酸化炭素固定技術に関する基礎的研究

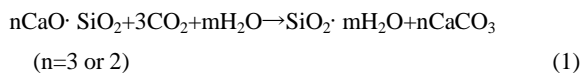
李 柱国*1・松尾 栄治*2

要旨: 本研究では、二酸化炭素気泡をセメントペーストに混入して、CO₂ 気泡コンクリートの製造を試みた。CO₂ 気泡コンクリートの圧縮強度およびアルカリ性 (pH 値) などを与える水セメント比、気泡量および養生方法の影響を検討した。圧縮強度は気泡量の増加に伴って小さくなったが、気泡の種類(空気泡, CO₂ 気泡)の影響は見られなかった。水セメント比が 0.35 以上であれば、気泡量と材齢に拘わらず、pH 値は 11.5 以上維持できた。なお、CO₂ 気泡コンクリートからの炭酸ガスの漏れは、気泡量とその限界値より小さい時に少なかった。CO₂ 気泡による炭酸塩反応は少なく、気泡コンクリートによる CO₂ 固定は主に物理固定と位置づけられる。
キーワード: 気泡コンクリート, 炭酸ガス, プレミックスフォーム方式, 圧縮強度, アルカリ性, 炭素固定量

1. はじめに

大気中の CO₂ 濃度は上昇を続けており、従来から地球温暖化対策として、省エネルギー技術の開発・導入等によって CO₂ の排出を抑制する現行の取組みのみでは不十分と考えられる。これらの対策に加えて、排出された CO₂ の貯留・利用技術を開発・導入する必要がある。そこで、コンクリートへの CO₂ 固定は、一つの有力な方法としてその技術開発を推進すべきであると考えられる。

セメントの主成分-C₃S: 3CaO·SiO₂ と C₂S: 2CaO·SiO₂ は、水分が存在する場合には、式(1)に示すように CO₂ と急速に反応して CaCO₃ を生成する¹⁾。コンクリート製品の脱型時間の短縮を目的として、養生釜での炭酸ガスによる養生方法が提案されている²⁾。付随的な効果として CO₂ が消費・固定される。理論上、63%以上の CaO を有するポルトランドセメントは、50%(質量比)の CO₂ が固定できる³⁾。しかし、炭酸ガスが製品内部へ拡散しにくく、反応時間が短いなどの理由で炭酸塩化反応は製品の表層部に留まり、CO₂ 固定率(炭酸ガスとセメントの質量比)は 18%以下である^{4),5)}。



一方、コンクリートの中性化として、セメントの水和生成物の一つである Ca(OH)₂ は CO₂ と反応して CaCO₃ を生じる。黒田らは、構造物を解体した後のコンクリート塊を炭酸ガスに暴露して、中性化反応を利用した CO₂ 固定技術について検討した⁶⁾。

プレフォーム法による気泡コンクリート(エアミルク, エアモルタル)は、作っておいた気泡をスラリー状のセメントペーストやモルタルに混入して作られたものである。気泡コンクリートは、軽量性・流動性・施工性・自立性などに非常に優れた特性を持ち、従来軽量盛土、埋め戻し(橋台背面, ボックスカルバート, 地下構造物など), 充填(管内, 基礎下, トンネル覆工など), 裏込注

入(擁壁, 護岸など), 空洞充填(防空壕など), 断熱床, 人工山などの多くの建築・土木工事で利用されている。近年、軽量性・流動性に優れた気泡コンクリートの特性がさらに認められて、その用途が徐々に広がってきている。軟弱地盤の沈下低減や地すべり地山での荷重軽減, 構造物や埋設物への土圧低減などのための採用に加え, 盛土の転圧困難な箇所や, 搬入が制限される箇所の盛土材としても適していることから新しい視点からの"新しい材料"として注目を集め, その有用性が高く評価されてきている。これらの用途で, 気泡コンクリートを所定の場所に打設すれば, ほぼ半永久的な存在となる。

この背景を踏まえて, 本研究では気泡コンクリートを用いる CO₂ 固定技術を開発するための基礎研究として, セメントペーストに炭酸ガスを多量に混入する方法を検討し, CO₂ 気泡コンクリート(CFC)のアルカリ性, 圧縮強度などの性能およびコンクリートからの炭酸ガスの逸脱, 化学反応による炭素固定量などについて調べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

実験には普通ポルトランドセメントを用いた。また, CO₂ 気泡をセメントペーストに連行するために, 高級アルコールエーテル硫酸エステルソーダ塩を主成分とした起泡剤を用いた。炭酸ガスはセメントと接触すると, 炭酸塩反応が直ちに発生して試料の流動性が低下するため, 炭酸ガス環境下で試料を練り混ぜる場合は凝結遅延剤を使用した。なお, プリーディングによる CO₂ 気泡のロスを防ぐために, 水セメント比を小さくした。試料の流動性を確保して CO₂ 気泡を多量に混入するために, 遅延型高性能 AE 減水剤を用いた。用いたセメントペーストの調合を表-1 に示す。

2.2 CFC の練混ぜ方法と試験項目

(1) 実験装置と CFC の練混ぜ

*1 山口大学大学院理工学研究科 情報デザイン工学系専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 セメントペーストの調合

W/C	起泡剤 (C×%)	SP (C×%)	遅延剤 (C×%)	CO ₂ 濃度 (%)
プレフォーム方式				
0.50	0.01~0.075	0.3~0.5	0.15, 0.20	80
	0	0.3	0	空気中
0.35	0.02~0.25	1.5	0.2	90
	0	0.3	0	空気中
0.55	0.01~0.06	0	0.1	90
	0	0	0	空気中
0.25	0.03~0.17	1.5	0.5	90
	0	1.5	0	空気中
ミックスフォーム方式				
0.35	0.5, 2.0, 6.0	0, 0.15	0.15	80

[Notes] C:セメントの質量, W:練混ぜ水の質量, W/C:水セメント比, SP:遅延型高性能減水剤

ミックスフォーム方式の影響も検討するために、図-1に示すガス置換型グローブボックスにおいてCO₂気泡コンクリート(CFC)の試料を練り混ぜた。グローブボックスは、アクリル製であり、その寸法は575×42×745mmである。ボックスの扉に2つの丸開口があり、ゴム手袋が付いている。ガス注入口と排出口がそれぞれボックスの下部と上部にある。

高速攪拌可能な小型ミキサー、セメントペーストの使用材料、供試体の作製に必要な器具と型枠などを予めボックスに入れておき、ボックスの扉を閉めた。下部のガス注入口を炭酸ガスボンベと接続し、炭酸ガスボンベより、0.5MPaの気圧でボックスに炭酸ガスを注入し、上部の排出口から炭酸ガスより軽いボックス内の空気を排出した。ガスの排出口にCO₂濃度計のプロープを挿入して、ボックスから排出されたガスのCO₂濃度を測定した。CO₂濃度が所定値に達したときに、ガスの出入口栓を閉めた。これ以降ボックス内の操作は、扉を閉めたままでゴム手袋を利用して行った。置換法でボックスの気体のCO₂濃度をほぼ100%にするためのCO₂注入時間が極めて長いので、CO₂濃度を80%と90%とした。

CFCの練混ぜには2つの方式を採用した。一つは、プレフォーム方式と呼ばれ、ミキサーに水と混和剤を入れ、2分間高速攪拌(586r.p.m)して気泡を作った。次に、セメントを投入し、通常の方法(386r.p.m)で1分間練り混ぜた。2つ目の方式は、ミックスフォーム方式と称し、混和剤、水およびセメントをミキサーに一括投入して、3分間高速攪拌した(586r.p.m)。空気泡コンクリート(AFC)の練混ぜは、通常の方法で室内において行った。

(2) 練混ぜ直後の温度変化

CFCとAFCの凝結・硬化反応速度の違いを明らかにするために、練混ぜ直後に熱電対によって試料の温度変化を測定した。

(3) 圧縮強度供試体の作製と養生



① CO₂濃度計, ② ミキサー, ③ ゴム手袋, ④ 濃度測定口およびCO₂出口, ⑤ CO₂入口, ⑥ CO₂ボンベへ接続

図-1 炭酸ガスの環境におけるCO₂気泡コンクリートの練混ぜと供試体の作製

練り混ぜた直後のCFC試料を直径50mm×高さ100mmの円柱型枠に充填し、ボックスから取り出した。供試体は、20±3℃の室内で2日間気中養生後に脱型し、所定の材齢まで20±3℃の水中養生または空気中養生を行った。養生終了後、圧縮強度試験を行った。

(4) 気泡量の計測

CFCとAFCの気泡量の算定は、次の手順で行った。まず、CFCやAFC円柱圧縮試験供試体の質量と体積を測定した。次に、セメントペーストの使用材料の密度と調合に基づいて、気泡が全くない場合の単位容積質量を算出し、円柱供試体の質量を有する場合の絶対体積(気泡がない時の体積)を算出した。さらに、式(2)によって供試体に対して気泡の体積百分率を計算した。

$$G = \frac{V_s - V_{cp}}{V_s} \times 100\% \quad (2)$$

ここに、G:気泡量(体積百分率)、V_s:供試体の体積、V_{cp}:供試体の質量を有し、気泡がないセメントペーストの絶対体積

(5) CFCからの炭酸ガスの漏洩

CFCに混入した炭酸ガスが外に漏れるかどうかを検証するために、W/Cがそれぞれ0.25, 0.35および0.55であり、CO₂濃度が90%のグローブボックスで作製された円柱供試体をボックスから取り出した後に、体積が3リットルのビニール袋に入れ、密閉して20±3℃の空気中養生を行った。これらの供試体は、28日材齢に袋の外から脱型を行い、CO₂濃度計のプロープを袋に挿入して、袋内のCO₂濃度を測定した。空気中のCO₂濃度と比較してCO₂漏洩を評価した。

(6) アルカリ性

炭酸ガスを混入したCFCのアルカリ性および材齢に伴う変化を考察するために、圧縮破壊された供試体から採

取した粉末を用い、pH6.86標準液とpHメーターによってpH測定を行った。

(7) 化学反応によるCO₂固定量

CO₂濃度が90%の環境で作製し、W/C、気泡量および養生方法と材齢が異なった8シリーズのCFC供試体から採取した粉末を用いて示差熱-熱量同時測定(DTA/TG)を行って、470~800℃間でCaCO₃の熱分解による重量減少を測定した。この重量減少率は、CFCの化学反応によるCO₂固定量とした。

(8) CFCの内部構造

W/Cと気泡量が異なる2種類の圧縮破壊されたCFC円柱供試体から採取したサンプルを用いて、電子顕微鏡(SEM)によって内部構造を観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 起泡剤の添加率とCO₂気泡の導入量の関係

二つの練混ぜ方法ごとの気泡量と起泡剤の添加率の関係をそれぞれ図-2に示す。供試体の作製環境のCO₂濃度は、80%または90%とした。図-2より、供試体中の気泡量は起泡剤の添加率と練混ぜ方法の影響を受けることがわかった。また、CO₂環境中においても、練混ぜ方法に拘わらず、起泡剤の添加率の増加につれて気泡量は線形的に増加することが認められた。図-2(a)を見ると、起泡剤の添加率が同じであれば、W/Cが小さいほど、気泡量は少なくなる傾向が見られた。これは、練混ぜ水量

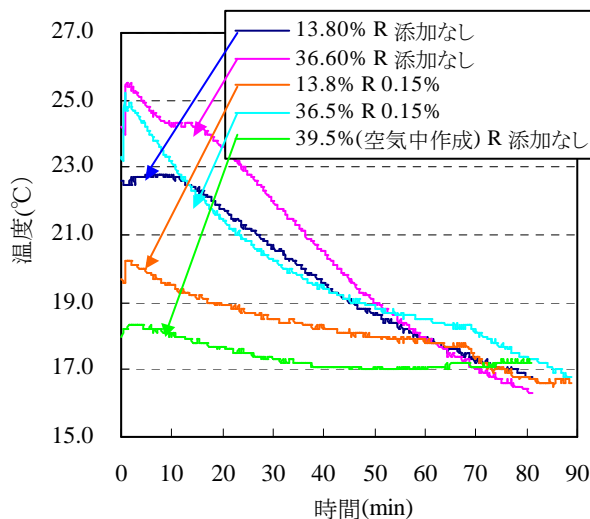
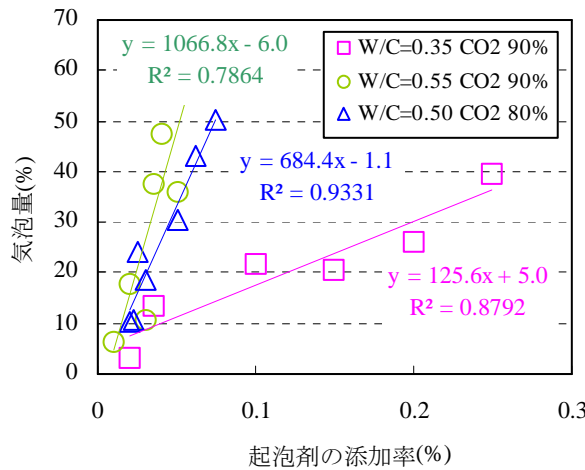
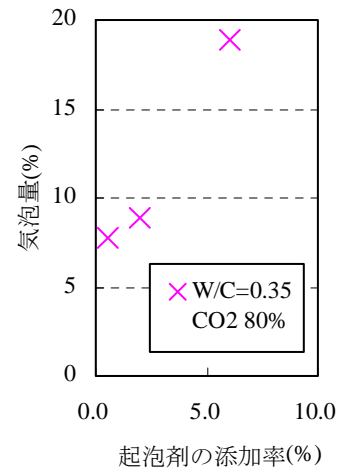


図-3 CO₂気泡コンクリートの温度の経時変化



(a) プレフォーム方式



(b) ミックスフォーム方式

図-2 気泡量と起泡剤の添加率の関係

の影響と考えられる。W/C=0.35の場合に比べ、W/C=0.55の試料は水量が多いため、高速攪拌した際に多量の気泡が作られた。なお、図-2(b)に示すように、起泡剤の添加率が同じ場合、プレフォーム方式に比べ、ミックスフォーム方式のほうが供試体に混入した気泡は少なかった。同じ気泡量を連行すれば、プレフォーム方式の場合より起泡剤の添加率を大幅に増加する必要がある。

3.2 CO₂気泡コンクリートの硬化反応速度

図-3は、空気中と濃度が90%のCO₂中で作製し、異なる気泡量を有する供試体(W/C=0.5)の温度の経時変化および遅延剤添加の有無の影響を示したものである。同図に示すように、遅延剤添加の有無によらず、CO₂環境中で作製した供試体の温度は、空気中で作製したものより高かった。しかし、80分間後にCFCとAFCの温度の違いが見られなかった。これは、練混ぜの過程ではセメントはCO₂と接触して、炭酸塩反応が速やかに発生したためである。また、遅延剤を添加すると、供試体の温度は未添加より低くなった。この結果より、セメントの水和反応を遅らせる遅延剤はセメントの炭酸塩反応の遅延にも適用できることが認められた。

3.2 CFCからの炭酸ガスの漏洩量

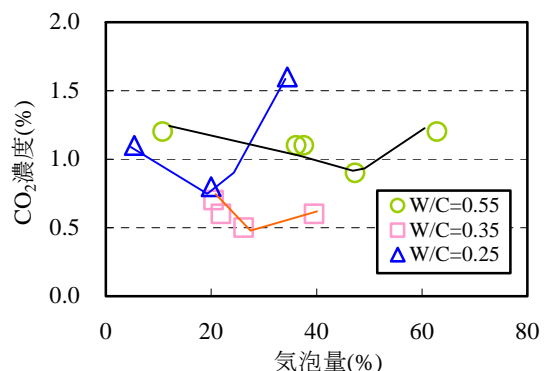


図-4 袋中のCO₂濃度と気泡量の関係

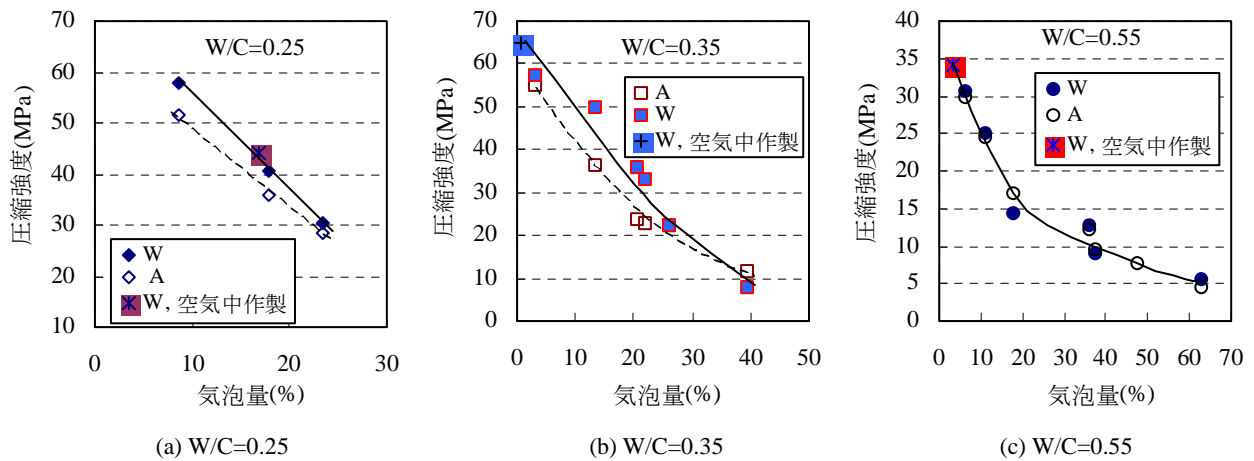


図-5 CO₂気泡コンクリートの圧縮強度と気泡量の関係(供試体の作製環境 CO₂濃度: 90%)

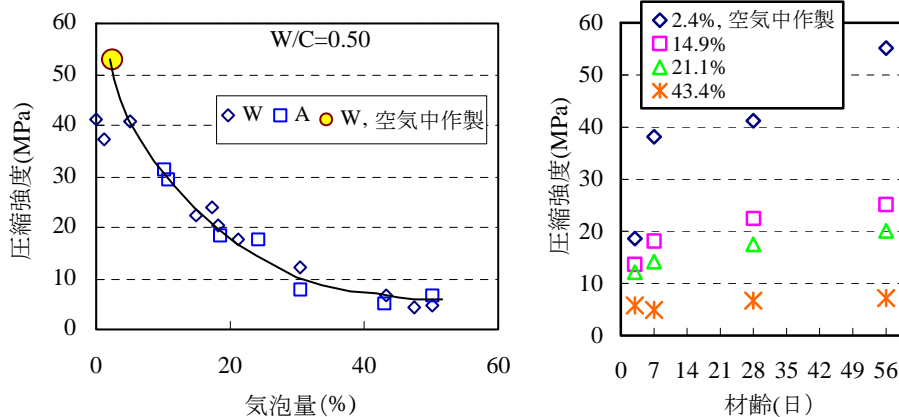


図-6 CO₂気泡コンクリートの圧縮強度と気泡量の関係(供試体の作製環境 CO₂濃度: 80%)

図-7 圧縮強度と材齢の関係

ビニール袋に密閉保管された供試体を脱型した後に測定した袋中の CO₂ 濃度を図-3 に示す。供試体を入れる前の袋中の CO₂ 濃度は 2% であった(空気中の CO₂ 濃度)。図-4 に示すように、脱型後の袋中 CO₂ 濃度は、気泡量の増加につれて最初は減少したが、気泡量がある値 (W/C が 0.25 の場合には約 20%, 0.35 の場合には約 25%, 0.55 の場合には約 50%) を超えると、逆に増加する傾向が見られた。袋中の CO₂ 濃度は、初期値(2%)より低くなったのは、養生期間に供試体の表層部の中酸化反応が袋内の空気中の CO₂ を消費したためであると考えられる。また、気泡量が多いほど、供試体の緻密度が低くなり、袋中の空気中の CO₂ が供試体の表層部に拡散しやすくなるため、袋中の CO₂ 濃度はより低下した。しかし、CO₂ 気泡量がある限界値を超えると、連続空隙が増え、炭酸ガスの一部は外に逸脱するため、袋中の CO₂ 濃度が上昇したものと推測される。炭酸ガスの一部が逸脱しても、袋中の CO₂ 濃度はまだ初期値より小さかったため、放出量は極めて少なかったと考えられる。W/C が 0.55 以上の場合には、気泡量が 50% であっても CO₂ の漏れは少ないことが認

められた。実環境において様々な外的要因の作用を受けるながら、供用される CFC の CO₂ 逸脱については今後の検討課題としたい。

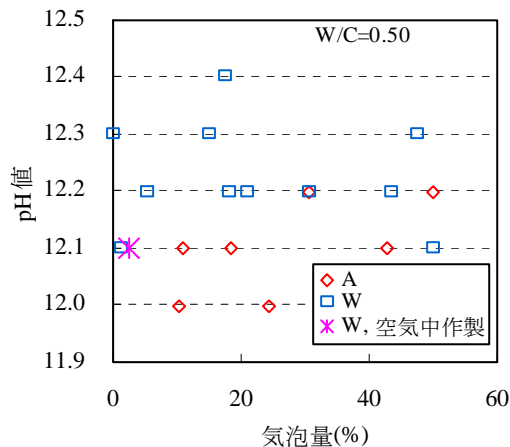
3.3 CFC の圧縮強度および材齢の影響

3 種類の供試体の作製環境(空气中、CO₂ 濃度 80%, 90%) で作製した円柱供試体の 28 日材齢の圧縮強度 F_c と気泡量 B の関係を図-5 と図-6 に示す。これらの図より、

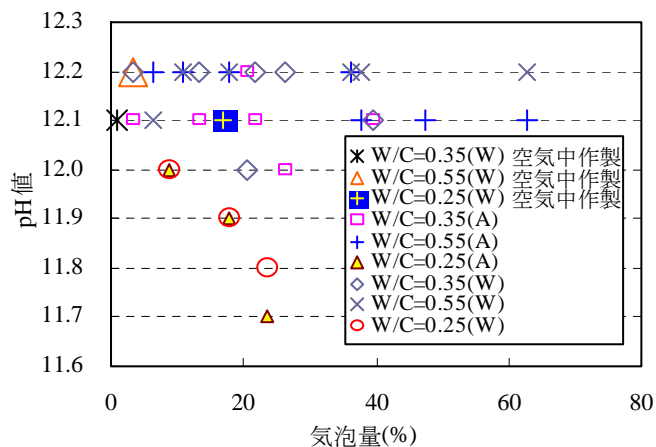
作製環境に拘わらず、気泡量の増加に伴って、当然のことながら、圧縮強度が低下することがわかった。また、空气中で作製した AFC の F_c - B 関係のプロットは、CO₂ 環境で作製し、同じ水セメント比を有する CFC の F_c - B 関係グラフ上に載っている。これにより、AFC に比べ、CO₂ の混入は、供試体の強度に影響を与えないことがわかった。

なお、W/C が 0.50 以上の場合、水中養生と空气中養生の圧縮強度に違いが見られなかった(図-5(c) と図-6 を参照)。しかし、W/C が小さい場合 (0.50 以下) には、気泡量が 40% 以内であれば、水中養生のほうが空气中養生に比べ、圧縮強度は大きいことが認められた(図-5(a), (b) を参照)。しかし、気泡量 40% 以上になると、養生方法の影響が見られなくなる。この結果から、CFC でも水中養生の方が圧縮強度は大きくなると考えられる。

空气中または CO₂ 濃度 80% の環境下で作製し、W/C=0.50 である気泡コンクリートの圧縮強度と材齢の関係を図-7 に示す。同図により、CFC の圧縮強度は、AFC と同じように、養生材齢の増加に伴って増加することが認められた。また、気泡量が 43.4% である CFC の圧縮強度の材齢に伴う増加が小さい傾向が見られた。



(a) 供試体の作製環境 CO₂ 濃度：80%



(b) 供試体の作製環境 CO₂ 濃度：90%

図-8 CO₂ 気泡コンクリートの pH 値と気泡量の関係

3.4 CFC のアルカリ性

気泡コンクリートの 28 日材齢の pH 値と気泡量の関係を図-8 に示す。凡例中の W と A の記号はそれぞれ水中養生と空気養生を表す。図-8 より、CO₂ 濃度 90% 中で作製した CFC の pH 値は、CO₂ 濃度 80% の場合より全体的に 0.1~0.2 程度低下した傾向が見られる。また、水セメント比 W/C が大きい場合 (0.25 以上)、pH 値は、CFC の作製環境の CO₂ 濃度に拘わらず 12.0 以上であり、養生方法の影響が明瞭には見られない。また、空気中で作製した AFC より pH 値は低下しないことがわかった。しかし、水セメント比が 0.25 である CFC の pH 値は、養生方法の影響を受けないが、12.0 以下であり、気泡量の増加につれて低下する傾向が見られた。

図-9 に、水セメント比と気泡量がそれぞれ 0.55 と 27.7% であった CFC の pH 値と材齢の関係を示す。同図によれば、最初の 1 ヶ月に pH 値は若干低下したが、1 ヶ月以降には pH 値は、ほとんど変わらず、材齢が 1 年になっても 11.5 以上であった。

文献7)によれば、コンクリートの pH 値が 11.5 以上であれば、鉄筋コンクリート中の鉄筋の表面不動態膜は破壊されない。Bertosらは、水がセメント、Ca(OH)₂ と CO₂ の反応を促進するが、水セメント比が 0.25 を超えると、セメント粒子の間隙が自由水に満たされて、CO₂ の拡散が阻害されるため、炭酸塩化反応は少なくなり、また環境の相対湿度が 50~70% の範囲であれば、炭酸塩化反応が速いと指摘されている⁸⁾。なお、W/C が 0.28 と 0.40 で、

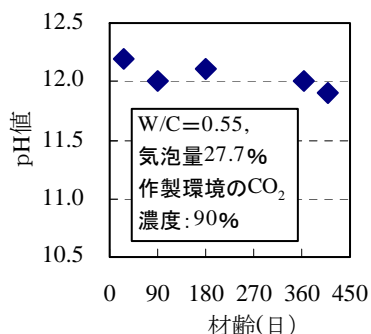


図-9 CFC の pH 値と材齢の関係

炭酸ガスで養生されたコンクリートの 2 ヶ月材齢の pH 値が 12.0 以上である実験結果は文献8)に示されている。したがって、W/C を 0.25 以上にすれば、CO₂ 気泡コンクリートのアルカリ性の確保に問題がないと思われる。

3.5 化学反応による CO₂ 固定量

CaCO₃ の熱分解による CFC の重量減少率を DTA/TG によって測定した結果を図-10 に示す。凡例中の W と A の記号はそれぞれ水中養生と空気養生、W と A の後ろの数値は養生期間(日数)を表す。炭酸塩反応による CO₂ 固定は、①CO₂ 環境における練混ぜ時、②作製した供試体の内部において CO₂ 気泡とセメントや Ca(OH)₂ との反応、③養生期間における表層部の中性化反応という三つの過程で発生すると考えられる。図-10 に示すように、ばらつきがあるが、CO₂ 気泡量が約 10~50% の範囲にあれば、CFC の重量減少率(WL)は気泡量の増加に伴ってあまり変わらない傾向が見られた。W/C=0.35 の CFC の WL の平均値が 5.14%(=(5.26% + 5.02%)/2)であった。W/C および養生方法・期間が同じであり、CO₂ 気泡量がほぼゼロである CFC の WL は 3.87% であった。したがって、CO₂ 気泡の混入による CO₂ 固定量は 1.27%(=5.14% -

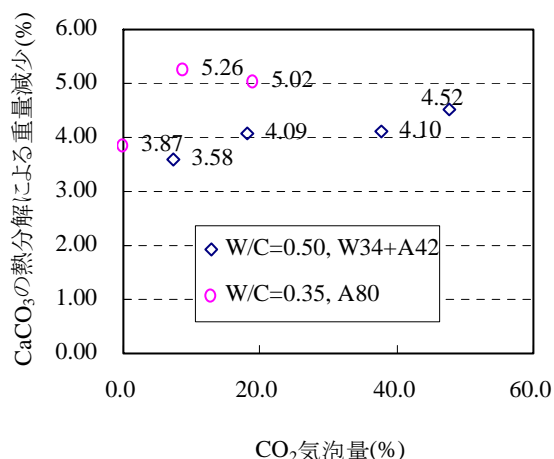


図-10 CFC の化学反応による CO₂ 固定量と気泡量の関係

3.87%)であった。W/C=0.50 の CFC の WL は W/C=0.35 の場合より小さいのは、空气中養生期間が短く、表層部の中性化反応が少ないためであると考えられる。

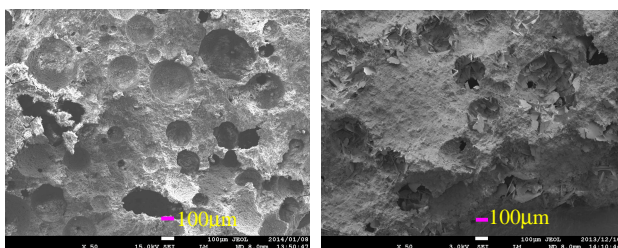
気泡コンクリート(エアモルタルやエアミルク)は、一般に希釈水と起泡剤で気泡群を生成しておいて、練混ぜ水とセメントなどで作ったスラリー状のセメントペーストやモルタルに気泡を混入して製造される。この方法で CFC を製造すれば、CO₂ 気泡が破壊しない限り、練混ぜ時の炭酸塩化反応は発生しない。CO₂ 気泡を 50%以下混入しても炭酸塩化反応による CO₂ 固定量は前述したように極めて少ないため、CFC による CO₂ 固定は物理的なものと考えても良い。

気泡量が 18.9%と 27.9%の CFC の内部構造の電子顕微鏡(SEM)写真を図-11 に示す。同図に示すように、気泡のサイズが 200 μ m 以下のものが多く、最大寸法が約 300 μ m であった。また、通常の気泡コンクリート(AFC)と同様に、CFC 中の CO₂ 気泡がほとんど独立なものである。独立な気泡の内外圧力は釣り合い状態にあるため、外からの圧力がない限り、気泡中の炭酸ガスがセメント中に拡散することおよび外に逸脱することは考えにくい。このため、CFC からの炭酸ガス漏れおよび内部炭酸塩化反応は少ない。したがって、CFC は、AFC のように独立な気泡を有すれば、気泡量によらず炭酸塩化反応が少なく、高いアルカリ性を長期的に維持できると考えられる。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの中性化抵抗性を損なわない CO₂ の固定技術を開発するための基礎研究として、セメントペースト中に CO₂ を連行させた気泡コンクリートの性能を考察した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) CO₂ 環境下においても、練混ぜ方法に拘わらず、起泡剤の添加率の増加につれて、気泡量は線形的に増加する。また、起泡剤の添加率が同じであれば、水セメント比が小さいほど、気泡量は少ない。なお、ミックスフォーム方式よりプレフォーム方式で混入できる気泡量は多い。
- 2) 気泡量の増加に伴って、圧縮強度は低下する。空気泡に比べ、CO₂ 気泡の混入は、気泡コンクリートの強度に大きな影響を与えない。



(a) W/C=0.35 気泡量 18.9% (b) W/C=0.50 気泡量 27.9%

図-11 CFC の気泡の寸法と分布(SEM 写真, $\times 50$)

- 3) 水セメント比が 0.35 以上であれば、CO₂ 気泡コンクリートの pH 値は、気泡量に拘わらず、11.5 以上を維持できる。
- 4) CO₂ 気泡コンクリートからの炭酸ガスの放出量は、気泡量に依存するが、気泡量がある限界値以下であれば、極めて少ない。気泡量の限界値は、水セメント比が 0.55 の場合には 50%である。
- 5) セメントの炭酸塩反応は水和反応より速い。水和反応を遅らせる通常の遅延剤は、炭酸塩反応に対しても遅延効果がある。
- 6) CO₂ 気泡量が 50%以下の気泡コンクリートによる CO₂ 固定は主に物理固定と位置づけられる。

今後、実使用環境における CFC からの炭酸ガスの逸脱量と長期的アルカリ性および CO₂ 気泡量が 50%以上の場合の化学反応による炭素固定量をさらに考察する予定である。

謝辞

本研究の実験に際しては、山口大学工学部感性デザイン工学科卒業生・横沼祐一君の助力を得た。また、論文の作成には、名古屋大学名誉教授・谷川恭雄先生にご指導をいただきました。本研究は科学研究費補助金(挑戦的萌芽, H24~H26年度, 研究代表者: 李柱国)によるものである。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Young, J. F., Berger R. L., and Breese J. : Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂, *Journal of American Ceramic Society*, Vol.57, No.9, pp.394-397, 1974.
- 2) Bierlich : Manufacture of portland cement products, U.S. Patent No.3468993, 1969.
- 3) Steinour H. H. : Some effects of carbon dioxide on mortars and concrete: A discussion, *Journal of American Concrete Institute*, Vol.55, No.2, pp.905-907, 1959.
- 4) Shao Y., Mirza M. S., and Wu. X. : CO₂ sequestration using calcium-silicate concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, No.33, pp.776-784, 2006.
- 5) Shi C., and Wu Y. : Studies on some factors affecting CO₂ curing of lightweight concrete products, *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 1087-1092, 2008.
- 6) 黒田泰弘・菊地俊文 : コンクリート塊による二酸化炭素の固定化に関する研究, 清水建設研究報告, No.86, pp.29-36, 2007.10
- 7) Shalon R., and Raphael M. : Influence of sea water on corrosion of reinforcement, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol.55, No.6, pp. 1251-1268, 1959.
- 8) Bertos M. F., et al : A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.112, pp.193-205, 2004.